

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 20. Выпуск 10
2025**

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

Сквозной номер 203

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 20. Issue 10
2025**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: 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	30.10.2025.
Подписан в свет	31.10.2025.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 19,07. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 340	

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:	30.10.2025

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Executive editor: *Alla R. Tabekova*

Corrector: *Oksana V. Ermikhina*

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova*

Layout: *Alina Y. Baykova*

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

Б.И. Гиясов
Роль климатических факторов в формировании экологии жарких городов России 1477

В.А. Егорова
Доходные дома конца XIX – начала XX века как элементы жилой двухэтажной
деревянной застройки Рязани 1486

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

С.Г. Саиян
Использование интегро-дифференциальных уравнений для моделирования распространения
сейсмических волн через барьер с эффектом памяти 1495

Ю.А. Шапошникова, Е.А. Калинин
Влияние начального прогиба профилированного настила на прочность сталежелезобетонной плиты
перекрытия в стадии эксплуатации 1508

А.Р. Туснин
Экспериментальные исследования дюбельных соединений элементов стальных конструкций 1522

О.А. Иванов, В.Н. Сидоров, П.И. Новиков
Управление параметрами расчетной модели пространственной конструкции по результатам
натурных испытаний 1534

П.А. Кореньков, Н.В. Федорова, Т.А. Ильющенко
Трещинообразование узлов сопряжения стержневых элементов из тяжелого бетона
при статическом и статико-динамическом нагружении 1542

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А.А. Лунёв, А.В. Явинский, С.В. Голиков, П.А. Саньков
Разработка составов геополимерных бетонов. 1553

В.А. Перфилов, Д.А. Ляшенко, М.Е. Николаев
Влияние дисперсного армирования на макро- и микроструктуру сухих строительных смесей
с применением активации 1565

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.И. Гиясов
Термогравитационная вентиляция жилых зданий. 1577

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА.
ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Н.Г. Верстина, О.О. Донская
Подход к формированию показателей оценки результативности управления кампусами
на принципах государственно-частного партнерства 1596

В.В. Глазкова, Н.А. Верстин, С.Ю. Король, Т.Н. Кисель
Повышение надежности и экономичности функционирования теплоснабжения городского
и жилищно-коммунального хозяйства 1609

Требования к оформлению научной статьи 1620

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Botir I. Giyasov
The role of climatic factors in forming the ecology of hot cities in Russia 1477
Valeria A. Egorova
Apartment buildings of the late XIX – early XX centuries as elements of two-storey wooden buildings in Ryazan. 1486

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

Sergey G. Saiyan
Using Integro-Differential Equations to Model the Propagation of Seismic Waves Through a Barrier with a Memory Effect 1495
Yuliya A. Shaposhnikova, Evgeny A. Kalinin
Influence of initial deflection of profiled deck on the strength of steel-reinforced concrete floor slab during operation 1508
Aleksandr R. Tusnin
Experimental studies of dowel connections of steel structural elements 1522
Oleg A. Ivanov, Vladimir N. Sidorov, Pavel I. Novikov
Control of parameters of the calculation model of a spatial structure based on the results of full-scale tests 1534
Pavel A. Korenkov, Natalia V. Fedorova, Tatiana A. Iliushchenko
Crack formation in heavy concrete reinforcing bar connection joints under static and static-dynamic loading of reinforced concrete structures 1542

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Aleksandr A. Lunev, Alexander V. Yavinskiy, Sergey V. Golikov, Petr A. Sankov
Development of geopolymers concrete compositions 1553
Vladimir A. Perfilov, Dmitry A. Lyashenko, Maksim E. Nikolaev
The effect of dispersed reinforcement on the macro- and microstructure of dry building mixes using activation 1565

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Adham I. Giyazov
Thermogravitational ventilation system for residential buildings 1577

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION.
ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Natalia G. Verstina, Olga O. Donskaya
Defining performance metrics for campus management based on public-private partnership principles. 1596
Valeriya V. Glazkova, Nikolai A. Verstin, Svetlana Yu. Korol, Tatiana N. Kisel
Improving the reliability and cost-effectiveness of urban and municipal heat supply systems 1609
Requirements for research paper design 1620

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).

Роль климатических факторов в формировании экологии жарких городов России

Ботир Иминжонович Гиясов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Совершенствование территорий современных городов способствует увеличению городской застройки и развитию транспортной и инженерной инфраструктуры. В связи с этим увеличивается потребление нефтепродуктов, что влияет на экологический баланс городских территорий. В крупных городах, расположенных в жарких регионах, формируются наиболее экстремальные экологические условия. Рост высотных зданий, интенсивное использование городского транспорта способствуют существенному загрязнению воздушного бассейна города. При высоких температурах, характерных для южных городов, загрязнение городского пространства является наиболее ощутимым.

Материалы и методы. Проанализирована экология в жарких городах России. Выявлены наиболее загрязненные участки городов, где концентрация загрязняющих веществ (ЗВ) превышает пределы допустимой из-за недостатка воздухообмена. Определена роль воздушных потоков термического происхождения в аэрации дворовых пространств.

Результаты. На примере девятиэтажного жилого здания в г. Волгограде выполнен анализ формирования воздушных потоков термического происхождения, описаны применяемые информационные материалы и научные методы. Приведен график натурных измерений скорости конвективных потоков у фасадов здания в разное время светового дня, регулирование которых может способствовать улучшению экологии городских территорий.

Выводы. Современные города с жарким климатом, которым характерна высотная плотная застройка, находятся в экологически неблагоприятных условиях. В дворовых пространствах создаются участки с застоями воздуха и концентрацией ЗВ в связи с нарушением аэрации территории. Проведенные исследования имеют практическую значимость и могут использоваться для оценки воздухообмена междомовых территорий при градостроительном планировании и развитии городских пространств. Формирование воздушных потоков термического происхождения, рассмотренные в исследовании, могут способствовать воздухообмену дворовых пространств и значительно улучшить экологическую ситуацию.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экология, аэрация, плотная застройка, градостроительное планирование, конвективные потоки, высотные здания, жаркий климат, транспортная инфраструктура, энергопотребление

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гиясов Б.И. Роль климатических факторов в формировании экологии жарких городов России // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 10. С. 1477–1485. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1477-1485

Автор, ответственный за переписку: Ботир Иминжонович Гиясов, giyasovbi@mgsu.ru.

The role of climatic factors in forming the ecology of hot cities in Russia

Botir I. Giasov

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

ABSTRACT

Introduction. The development of the territories of modern cities contributes to the increase in modern urban development and the development of transport and engineering infrastructure. In this regard, the consumption of petroleum products is increasing, which seriously affects the ecological balance of urban areas. In large cities located in hot regions, the most extreme environmental conditions are formed. The growth of modern high-rise buildings, the intensive use of urban transport makes the air pollution of the city more significant. At high temperatures characteristic of southern cities, the pollution of urban space is the most noticeable.

Materials and methods. The paper analyzes the ecology of hot cities in Russia. The most polluted areas of cities were identified, where the concentration of pollutants exceeds the permissible limits due to lack of air exchange. The role of air flows of thermal origin in the aeration of yard spaces is determined.

Results. On the example of a nine-story residential building in the city of Volgograd, an analysis was made of the forma-

tion of air flows of thermal origin. description of the applied information materials and scientific methods. A graph of field measurements of the speed of convective flows near the facades of the building at different times of the daylight hours, the regulation of which can improve the ecology of urban areas, is given.

Conclusions. Modern cities with a hot climate, which are characterized by high-rise dense buildings, are in environmentally unfavorable conditions. In the yard spaces, areas with stagnation of air and the concentration of pollutants are formed, due to the violation of the aeration of the territory. The studies carried out are of practical importance and can be used to assess the air exchange of inter-house territories in urban planning and the development of urban spaces. The formation of air flows of thermal origin, considered in the study, can contribute to the air exchange of yard spaces and significantly improve the ecological situation.

KEYWORDS: ecology, aeration, dense buildings, urban planning, convective currents, high-rise buildings, hot climate, transport infrastructure, energy consumption

FOR CITATION: Giyasov B.I. The role of climatic factors in forming the ecology of hot cities in Russia. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(10):1477-1485. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1477-1485 (rus.).

Corresponding author: Botir I. Giyasov, giyasovbi@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие экономики ведущих стран в современном мире демонстрирует динамический рост. Согласно базовым прогнозам в 2024 и 2025 гг. темп ее роста будет составлять 3,2 %. При этом основной тенденцией мировой экономики станет переход от индустриального к постиндустриальному обществу, где преобладает инновационный сектор с высокопроизводительной промышленностью. Кроме того, большое внимание должно уделяться уровню образования и окружающей среде. Окружающей средой принято считать совокупность природных, антропогенных и природно-антропогенных объектов, окружающих человека. Человек все время стремится совершенствовать окружающую среду, создавая удобную для проживания искусственную среду — жилище и город. Процесс урбанизации, влияющий на увеличение доли городского населения, вызывает увеличение городов. В результате внутренней и внешней миграции в настоящее время около половины населения Земли проживает в городах. В связи с этим в городской среде увеличивается плотность населения, число многоэтажных построек и высотных зданий, стремительными темпами развивается инженерная и транспортная инфраструктура. Таким образом, урбанизация, способствующая увеличению городского населения, приводит к активному развитию городских территорий и негативно влияет на экологию воздушного бассейна города.

Воздушный бассейн — это воздушное пространство в пределах городской территории жизненной среды. Воздушный бассейн города подвергается активному воздействию жизненной среды, что изменяет микроклиматические и экологические условия городской среды. Городская среда, являясь искусственно созданной, формируется с учетом природно-климатических факторов. Активное развитие городских территорий содействует росту разнообразия антропогенных факторов, существенно влияющих на экологию городской среды. Производственные предприятия и городской транспорт, которые активно потребляют топливно-энергетические ресурсы, являются значимыми источниками выбросов, загрязняющих воздушную среду.

Города, для которых характерны сложившиеся природно-климатические условия и определенный тип хозяйственной деятельности, в процессе такого развития изменяют свою структуру. Основные климатические характеристики, которые учитываются при планировании городских территорий, — температурный и ветровой режим, влажность воздуха и солнечная радиация. Рост современных высотных зданий, повышение плотности застройки, меняя архитектуру города, влияют как на экологию, так и на климатические характеристики городской среды. Плотная застройка приводит к нарушению естественной аэрации воздушного бассейна, изменению температурного и радиационного режима развивающихся территорий города [1]. Также при активном использовании горожанами городской территории и транспорта происходит интенсивное загрязнение воздушного бассейна. Наибольшая концентрация загрязняющих веществ (ЗВ) наблюдается в замкнутых городских территориях в связи со слабой аэрацией. Помимо этого, тепловой режим, который формируется в зависимости от микроклиматических условий городского пространства, оказывает влияние на экологию окружающей среды [2–4].

В зависимости от географического расположения крупные мегаполисы находятся в определенных климатических условиях. Для крупных регионов, мегаполисов и городских пространств характерны макро-, мезо- и микроклиматические явления природы.

Явления природы, которые характеризуют климатические факторы крупного географического ландшафта, принято считать макроклиматическими. Примером могут служить климатические условия территории Сибири, республик Закавказья, республик Центральной Азии. Человечество не в состоянии регулировать, управлять макроклиматическими явлениями.

Мезоклиматические явления природы — это климатические условия, характерные на территории городов. Создавая города с высотными зданиями, искусственными мощениями, территории с искусственными покрытиями, человек может влиять на мезоклиматические явления.

Климатические изменения, происходящие в мелких масштабах конкретных участков, т.е. на улицах

городов, площадок, междомовых пространствах и помещениях, считаются микроклиматическими явлениями. Микроклиматическими явлениями можно управлять и регулировать их параметры. Эти явления играют определяющую роль не только в формировании природно-климатических факторов местности, но и в изменении экологии территорий жизнедеятельности человека [5–7].

Итак, территориям городского пространства присущи микроклиматические явления, которые имеют очаговый характер своего возникновения, они регулируемые и управляемые.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Южным городам России и стран СНГ свойственны признаки жарко-сухого и жарко-влажного климата. Территории Центральной Азии и Казахстана характеризуются жарко-сухим климатом, а территории Закавказья — жарко-влажным. На территории южных городов различают следующие условия жаркого климата: жарко-штилевые и жарко-ветренные погодные условия, а также жарко-сухие и жарко-влажные условия климата. Жарко-штилевые условия климата формируются от особенностей географического расположения города. Наряду с этим при развитии городского строительства на территориях городов создаются штилевые условия, вызванные нарушением аэрации территорий [8–10]. Этому способствует рост количества высотных строений и их плотность. Интенсивное использование го-

родского транспорта и энергоресурсов промышленными и гражданскими зданиями увеличивает загрязнение воздушной среды города. В жарких регионах при штилевых условиях особо ощущается влияние этих выбросов. При этом отсутствие необходимой аэрации территорий городов существенно усугубляет экологическую обстановку. В городском пространстве возникают температурные инверсии, которые создают «острова тепла», приводящие к концентрации и застою воздушных масс [11, 12]. Следовательно, одним из способов улучшения экологической ситуации в указанных обстоятельствах служит регулирование и обеспечение необходимой комфортной аэрации городских территорий. Комфортный аэрационный режим на территории городской среды принято считать при скорости ветра от 1 до 5 м/с. Зоны, где скорость ветра не достигает 1 м/с, признаются непрветриваемыми. Характерные для современных зданий городских территорий большая высотность и типовые прямоугольные в плане формы изменяют скорость ветра, создавая участки с низкой скоростью воздухообмена менее 1 м/с [13]. Наиболее оптимальным аэрационным режимом считаются участки со скоростью ветра от 1 до 3 м/с. Для достижения оптимального аэрационного режима при градостроительном планировании следует по возможности сохранить сложившиеся аэродинамические условия местности. При планировании городской территории, развитии жилых кварталов и обще-



Рис. 1. Карта жарких городов России

Fig. 1. Map of hot cities in Russia

ственных зон необходимо учитывать аэрационный режим.

Таким образом, можно отметить, что в городах с жаркими условиями климата экологическая обстановка усугубляется за счет высокой температуры, увеличения плотно застроенных территорий и вследствие нарушения местных аэродинамических условий. Подобные ситуации особенно ощущаются в самых жарких городах Российской Федерации. По данным Гидрометцентра выделены 15 городов России с жаркими условиями климата (рис. 1).

К самым жарким городам России относятся Волгоград, Астрахань, Краснодар, Сочи, Яшкуль. В Волгограде в летнее время температура может достигать 44–48°, в Астрахани — 35–40°. Город Краснодар отличается влажным субтропическим климатом. В летнее время температура может доходить до более 40°, но небольшая удаленность от моря обеспечивает постоянные прохладные и освежающие бризы.

Климат г. Сочи — субтропический, что не дает даже зимой опускаться температуре ниже нуля. Максимальная температура может достигать 40°. Еще одним из жарких городов России является небольшой городок Яшкуль, где температура летом может быть 35°.

Рост плотности населения в этих городах приводит к потребности в гражданских зданиях, развитии транспортной и инженерной инфраструктуры. Увеличивается потребность в использовании автомобильного транспорта. Наиболее плотно заселен-

ные города России с жарким климатом — Волгоград и Краснодар. В настоящее время население Волгограда составляет 1 008 998 чел., Краснодара — 1 380 000 чел.

Они относятся к числу 60 городов РФ, где ЗВ вредные для человека превышают предельно допустимые нормы в несколько раз. Выбросы в окружающую среду в таких городах производятся из стационарных и передвижных источников. Особое внимание заслуживают передвижные источники, такие как общественный и личный автотранспорт. Активная деятельность стационарных и передвижных источников загрязнения в условиях города увеличивает концентрацию химических соединений в воздушной среде (табл. 1).

Данные химические соединения содержатся не только в газах, но и в твердых частицах диаметром менее 10 мкм, которые образуются из-за выбросов электростанций на ископаемом топливе, производственных процессов и систем отопления, работающих по этой же системе, и благодаря транспорту, работающему на бензине. Попадая через легкие в организм человека, эти соединения могут вызывать различные опасные заболевания. Монооксид углерода является невидимым газом, который образуется при неполном сгорании горючего и в большой концентрации содержится в автомобильных выхлопных газах. Электростанции также выделяют этот газ, но современные электростанции спроектированы более безопасными с обеспечением максимальной эффективности сгорания. Монооксид

Табл. 1. Химические соединения, содержащиеся в воздушном бассейне городов

Table 1. Chemical compounds contained in the air basin of cities

Тип загрязнителя и источник его появления в атмосфере Type of pollutant and source of their appearance in the atmosphere	Класс опасности Hazard class	Предельно допустимая концентрация (ПДК) среднесуточная, мг/м³ Average daily MPC, mg/m³	ПДК минимальная разовая, мг/м³ MPC minimum one-time, mg/m³
Аммиак (нитрид водорода) (удобрения, утечка с производственных складов) Ammonia (hydrogen nitride) (fertilizers, leakage from production warehouses)	IV	0,4	0,2
Азота диоксид (электростанции, работающие на угле) Nitrogen dioxide (coal-fired power plants)	II	0,04	0,085
Бензол (нефтеперерабатывающие заводы) Benzene (oil refineries)	II	0,1	1,5
Углерода оксид (выхлопы автомобильных двигателей) Carbon monoxide (car exhausts)	IV	3	5
Серы диоксид (сжигание нефти и угля) Sulfur dioxide (burning oil and coal)	III	0,05	0,5
Неорганическая пыль (выбросы электростанций) Inorganic dust (emissions from power plants)	III	0,05	0,15
Свинец (автомобильные выхлопы) Lead (car exhausts)	I	0,0003	—

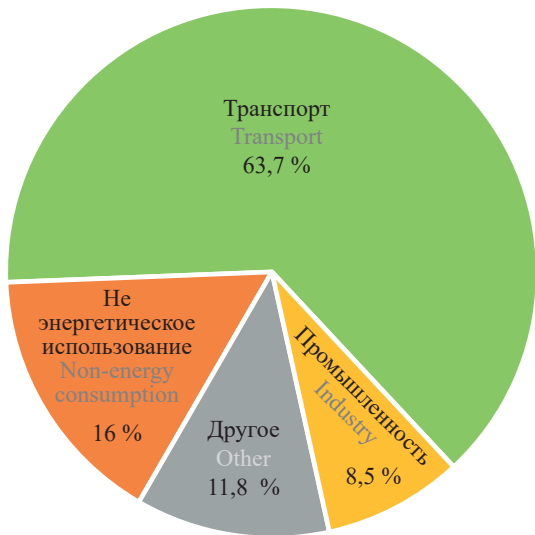


Рис. 2. Потребление нефтепродуктов по отраслям
Fig. 2. Consumption of petroleum products by industry

углерода может приводить к удушью, поскольку вытесняет кислород из кровотока при длительном воздействии и значительных концентрациях. Таким образом, активное развитие транспортного движения в городах способствует формированию экстремальной экологической обстановки, опасной для здоровья человека.

Очевидно, что с увеличением плотности населения в городах, которому способствует внутренняя и внешняя миграция, растет потребность в применении транспорта. Использование традиционного городского транспорта, как правило, связано с потреблением нефтепродуктов транспортным сектором [14]. По данным Международного энергетического агентства (МЭА), в период 1990–2016 гг. в мире транспорт стал самым быстрорастущим сектором потребления нефтепродуктов. Использование нефтепродуктов транспортным сектором в 2017 г. составило около 65 % от потребления по всем отраслям (рис. 2).

В больших городах России с каждым годом наблюдается увеличение транспортных потоков, плот-

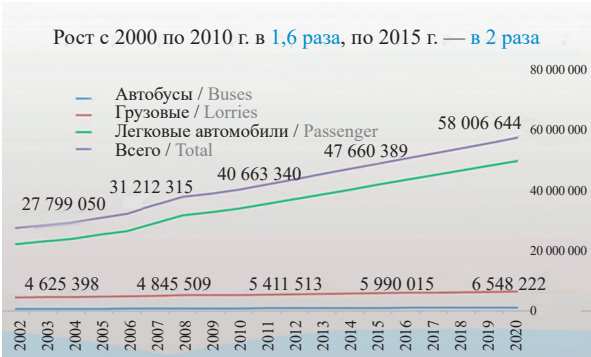


Рис. 3. Динамика роста количества автомобилей в Российской Федерации с 2002 по 2020 г.

Fig. 3. Dynamics of growth in the number of cars in the Russian Federation from 2002 to 2020

ности застройки, развивается инфраструктура. Развита транспортная сеть, образующая совокупность улиц, транспортных проездов, надземных и подземных транспортных линий, обслуживается различными видами городского транспорта. На рис. 3 по данным Федеральной службы государственной статистики представлена динамика роста количества автомобилей в РФ с 2002 по 2020 г.

Как видно из диаграммы, количество автомобилей увеличилось в два раза. В связи с этим в условиях развития городов и населенных пунктов территории деятельности человека преобразуются в потенциальные очаги наибольшей концентрации загрязнения вредными и ядовитыми примесями.

В жарких городах-миллионниках России, к которым относится Волгоград, активное потребление нефтепродуктов городским транспортом способствует выбросам выхлопных газов в городскую среду. Высокие температуры, характерные для г. Волгограда, и выхлопные газы с большой концентрацией химических элементов в воздухе городской территории создают экстремальные экологические условия. Кроме того, замкнутые придомовые пространства в современных мегаполисах формируют зоны с нарушенным воздухообменом [15–17]. В таких пространствах наблюдается высокая концентрация загрязняющих выбросов, негативно влияющих на самочувствие жителей города.

Современные городские строения отличаются прямоугольными формами и значительной высотой. Подобные высотные здания с большой протяженностью по длине существенно препятствуют ветровым потокам, вследствие чего ограничивают аэрацию дворовых пространств [18, 19]. При таких условиях на замкнутых территориях образуются устойчивые зоны с застоями воздуха и концентрацией ЗВ. Высокие летние температуры, характерные для таких жарких городов, как Волгоград, усугубляют влияние ЗВ на окружающую среду и горожан. В этих условиях необходимо искать пути обеспечения воздухообмена в замкнутых дворовых пространствах. Одним из решений данной задачи может быть организация воздухообмена с помощью конвективных потоков термического происхождения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Известно, что при разности температуры между поверхностью и окружающим воздухом формируются конвективные потоки. Повышение температуры поверхности происходит путем аккумуляции тепла от солнечной энергии. Аккумуляция тепла элементами застройки зависит от способности инсолируемых поверхностей поглощать или отражать солнечную радиацию. Включение в городскую архитектуру огромного количества элементов, сохраняющих тепло, таких как бетон, асфальт, металлы, стекло и другие, уменьшает альбедо (табл. 2) [20]. Это спо-

Табл. 2. Значение альbedo различных поверхностей

Table 2. Albedo value of different surfaces

Вид поверхности Surface type	Значение альbedo The meaning of albedo
Асфальтное покрытие Asphalt pavement	0,05–0,20
Бетонная поверхность Concrete surface	0,10–0,35
Металлическое покрытие Metallic coating	0,10–0,15
Стекло Glass	0,75–0,90
Газон Lawn	0,25–0,30
Почва Soil	0,10–0,30

способствует значительному повышению температуры инсолируемых поверхностей.

В связи с этим тепло, которое аккумулируется в дневное время деятельной поверхностью, создает повышение среднесуточных показателей температур, отдавая это тепло в вечернее и ночное время. С другой стороны, инсолируемые и затененные поверхности элементов дворового пространства, создавая разность температур, формируют конвективные потоки. На основе анализа мезоклиматических условий г. Волгограда установлено, что летом интенсивность

солнечной радиации в дневное время на горизонтальные поверхности достигает 940 Вт/м², на вертикальные — 810 Вт/м², температура воздуха +46 °С при слабом ветре до 3 м/с. При этом температура инсолируемых поверхностей городской застройки достигает +75 °С. Температура поверхностей, находящихся в тени, достигает лишь +25 °С. Поверхность инсолируемого асфальта и находящегося под тенью деревьев создает разницу температур 20–25 °С. В штилевых условиях подобная разница температур создает воздушные потоки термического происхождения, обеспечивая циркуляцию воздушных масс на местности. Разность температур различных рядом расположенных поверхностей влияет на активность и мощность конвективных потоков, формируя у фасадов зданий мощные турбулентные потоки [21–23]. Для оценки формирования конвективных потоков у фасадов здания были проведены натурные измерения скорости конвективных потоков у фасадов девятиэтажного жилого дома в г. Волгограде. На основе замеров построен график изменения максимальной скорости конвективного потока по высоте здания у стен разной ориентации в период светового дня (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что в течение светового дня у разных фасадов здания формируются конвективные потоки различной интенсивности, скорость которых достигает до 3 м/с. Определено, что конвективные потоки имели большую продолжительность около восточной и южной стен. У восточной стены конвективные потоки наблюдались с 17–21 ч. При этом толщина движущегося слоя увеличивалась, начиная от основания до верха здания. Максимальная скорость фиксировалась у верха стены здания восточной ориентации и достигала 2,84 м/с в 14 ч, у западного фасада — 3,2 м/с в 18 ч, у южного фасада — 2,78 м/с в 14 ч.

Замкнутые дворовые пространства, как совокупность горизонтальных и вертикальных поверхностей, являются аккумуляторами солнечной радиации, способствующими формированию воздушных потоков. Проведенные исследования и замеры показали, что у фасадов разной ориентации воздушные потоки термического происхождения имеют различную скорость в разное время. При таких условиях немаловажную роль в регулировании аэрационного режима играют благоустройство и озеленение междомовых территорий. На основе выполненных исследований построена модель формирования воздушного потока термического происхождения для дворового пространства при разных условиях озеленения (рис. 5).

Из модели (рис. 5) видно, что аэрационный режим городских территорий при жарко-штилевых условиях климата можно регулировать. В городах с высокими температурными показателями при плотной застройке образуются зоны с застоями воздуха и высокой концентрацией загрязняющих выбросов.

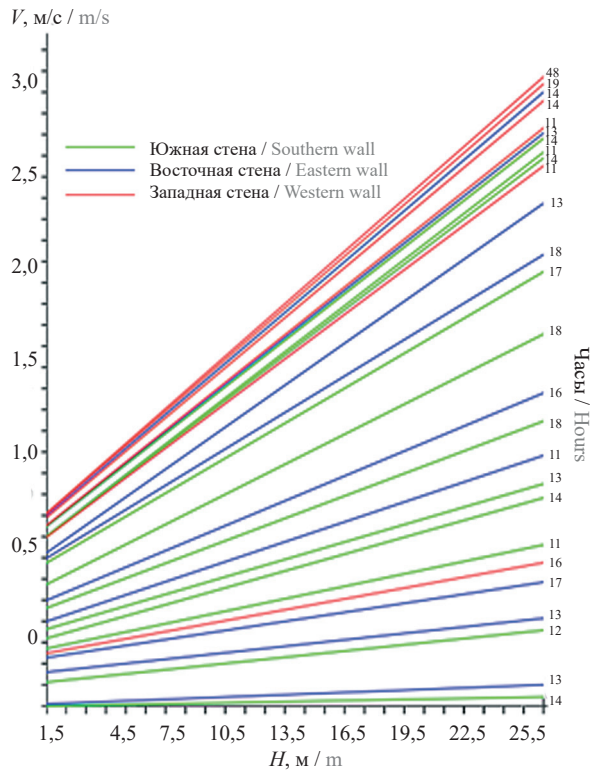


Рис. 4. Изменения максимальной скорости у стен здания в течение светового дня

Fig. 4. Changes in the maximum speed at the walls of the building during daylight hours

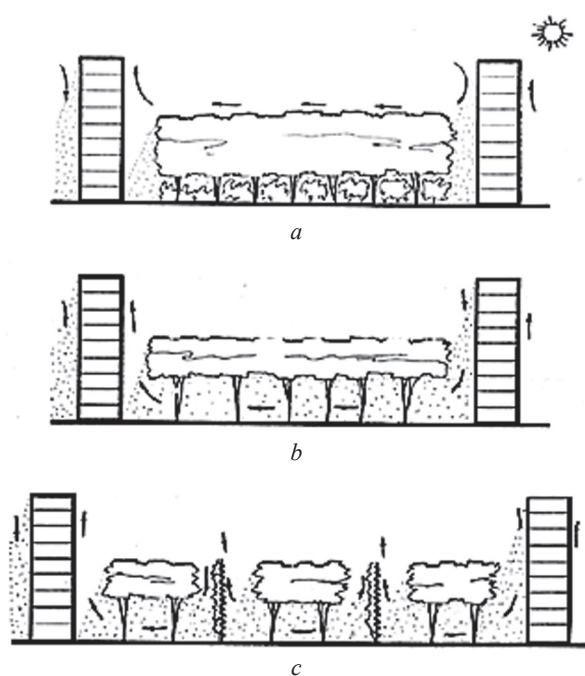


Рис. 5. Влияние характера озеленения двора на формирование воздушного потока: *a* — низкоштабное, крупнокронное озеленение; *b* — высокоштабное, крупнокронное озеленение; *c* — разделение большого пространства двора жалюзийными стенками

Fig. 5. The influence of the nature of yard landscaping on the formation of air flow: *a* — low-stem, large-crown landscaping; *b* — high-stem, large-crown landscaping; *c* — division of a large courtyard space with louvered walls

Правильная оценка градостроительных факторов, оптимизация благоустройства городских кварталов с учетом инсоляционного режима способствуют формированию конвективных потоков и улучшению аэрационного режима городских территорий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В крупных городах с жаркими условиями климата сочетание высокой температуры и загрязняющих веществ в воздухе создают экстремальную экологическую обстановку.

Замкнутые дворовые пространства, характерные для городской застройки, формируют участки, где концентрация ЗВ превышает пределы допустимой в связи с нарушением воздухообмена.

Инсоляция поверхностей городской застройки в разное время светового дня создает разность температур в дворовом пространстве, в связи с чем формируются конвективные потоки, улучшающие воздухообмен территории.

Ориентация зданий, планировочные решения, озеленение, расстояния между зданиями и их высота создают условия для инсоляции, что способствует возникновению регулируемых конвективных потоков.

При планировании городских территорий в условиях жаркого климата следует учитывать условия возникновения воздушных потоков термического происхождения и искать пути их регулирования, что может обеспечить необходимую аэрацию и улучшить экологию городской среды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гиясов Б.И., Зуева М.К. Исследование факторов, влияющих на экологию воздушного бассейна современных городов // Экология урбанизированных территорий. 2021. № 4. С. 19–24. DOI: 10.24412/1816-1863-2021-4-19-24. EDN UTHTXY.

2. Большеротов А.Л., Пряхин В.Н. Экологические проблемы плотно застроенных урбанизированных территорий // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2009. № 3. С. 72–76. EDN KVUXEV.

3. Кочуров Б.И., Ивашкина И.В. Экологические критерии и показатели территориального планирования города // Проблемы региональной экологии. 2010. № 4. С. 24–32. EDN NBYGEL.

4. Кашинцева В.Л., Леонова Д.А., Гиясов Т.Б. Роль конвективных потоков в экологии воздушного бассейна города // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. № 12 (1012). С. 27–30. EDN VNBPFV.

5. Hosseini M., Javanroodi K., Nik V.M. High-resolution impact assessment of climate change on building energy performance considering extreme

weather events and microclimate — Investigating variations in indoor thermal comfort and degree-days // Sustainable Cities and Society. 2022. Vol. 78. P. 103634. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103634

6. Pioppi B., Pisello A.L., Ramamurthy P. Wearable sensing techniques to understand pedestrian-level outdoor microclimate affecting heat related risk in urban parks // Solar Energy. 2022. Vol. 242. Pp. 397–412. DOI: 10.1016/j.solener.2021.05.076

7. Степанова Н.В., Шлычков А.П. Влияние комплекса метеорологических условий на загрязнение атмосферного воздуха города // Казанский медицинский журнал. 2004. Т. 85. № 5. С. 380–383. EDN HRMKPX.

8. Чекмарева О.В. Использование модели улицы промышленного города для управления пылегазовыми выбросами от автомобильного транспорта в атмосферу (на примере г. Оренбурга) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2005. С. 235–238.

9. Giyasov B.I., Giyasov T.B. Factors affecting modern urban environment // E3S Web of Confer-

ences. 2020. Vol. 217. P. 02006. DOI: 10.1051/e3s-conf/202021702006

10. Скобелева Е.А., Абрамов А.В., Пулипенко О.В., Пчеленок О.А., Родичева М.В. Прогнозирование динамики воздушной среды в городской застройке // Строительство и реконструкция. 2019. № 1 (81). С. 106–114. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-81-1-106-114. EDN GPZNCG.

11. Koepke M., Monstadt J., Pilo' F., Otsuki K. Rethinking energy transitions in Southern cities: Urban and infrastructural heterogeneity in Dar es Salaam // Energy Research & Social Science. 2021. Vol. 74. P. 101937. DOI: 10.1016/j.erss.2021.101937

12. Wang Q., Wang Y., Fan Y., Hang J., Li Y. Urban heat island circulations of an idealized circular city as affected by background wind speed // Building and Environment. 2019. Vol. 148. Pp. 433–447. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.11.024

13. Сокольская О.Н. Архитектурно-планировочные средства для создания благоприятной экологической обстановки в городах с жарко-штилевыми климатическими условиями // Вестник Таджикского технического университета. 2009. Т. 2–6. № 6. С. 39–41. EDN MBHEUF.

14. Баумаков И.А. Повышение энергоэффективности в транспортном секторе // Энергосбережение. 2010. № 1. С. 26–33. EDN UZCZRP.

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

16. Cheng B., Gou Z., Zhang F., Feng Q., Huang Z. Thermal comfort in urban mountain parks

in the hot summer and cold winter climate // Sustainable Cities and Society. 2019. Vol. 51. P. 101756. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101756

17. Konijnendijk C.C. Science for the Sustainable City: Empirical insights from the Baltimore School of Urban Ecology // Urban Forestry & Urban Greening. 2020. Vol. 53. P. 126737. DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126737

18. Табунчиков Ю.А., Шилкин Н.В. Аэродинамика высотных зданий // АВОК. 2004. № 8. С. 21–23.

19. Huang J., Gu M., Gao Y. Blockage effects on aerodynamics of isolated tall buildings under uniform turbulent flows // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2021. Vol. 212. P. 104607. DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104607

20. Ким Д.А. Влияние городского острова тепла на микроклимат урбанизированного пространства // Инженерный вестник Дона. 2021. № 12 (84). С. 435–445. EDN JLNMEQ.

21. Самарин О.Д. Нормирование энергопотребления здания с учетом теплопоступлений от солнечной радиации // Жилищное строительство. 2013. № 1. С. 32–33. EDN PVXZBJ.

22. Giasov B.I., Giasova I.V. Regulation of air exchange in urban areas to improve their environment // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 193. P. 01034. DOI: 10.1051/mateconf/201819301034

23. Малявина Е.Г., Бирюков С.В. Расчет воздушного режима многоэтажных зданий с различной температурой воздуха в помещениях // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2008. № 2. С. 40–44. EDN IJPZCZ.

Поступила в редакцию 4 ноября 2024 г.

Принята в доработанном виде 4 августа 2025 г.

Одобрена для публикации 8 августа 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: Ботир Иминжонович Гиясов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 297626, Scopus: 57201187213, ORCID: 0000-0002-6413-1902; giasovbi@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Giasov B.I., Zueva M.K. Study of factors affecting ecology of the air basin in modern cities. *Ecology of Urban Areas*. 2021; 4:19-24. DOI: 10.24412/1816-1863-2021-4-19-24. EDN UTHXTY. (rus.).

2. Bolsherotov A.L., Pryakhin V.N. Ecological problems of densely built-up urban areas. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2009; 3:72-76. EDN KVUXEV. (rus.).

3. Kochurov B.I., Ivashkina I.V. Environmental criteria and indicators of urban planning. *Regional*

Environmental Issues. 2010; 4:24-32. EDN NGBYEL. (rus.).

4. Kashintseva V.L., Leonova D.A., Giasov T.B. The role of convective flows in the urban air basin ecology. *Bulletin of Construction Equipment*. 2018; 12(1012):27-30. EDN VNBPVF. (rus.).

5. Hosseini M., Javanroodi K., Nik V.M. High-resolution impact assessment of climate change on building energy performance considering extreme weather events and microclimate — Investigating variations in indoor thermal comfort and degree-days. *Sustainable*

Cities and Society. 2022; 78:103634. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103634

6. Pioppi B., Pisello A.L., Ramamurthy P. Wearable sensing techniques to understand pedestrian-level outdoor microclimate affecting heat related risk in urban parks. *Solar Energy*. 2022; 242:397-412. DOI: 10.1016/j.solener.2021.05.076

7. Stepanova N.V., Shlychkov A.P. Effect of complex of meteorologic conditions on atmospheric pollution of the city. *Kazan Medical Journal*. 2004; 85(5):380-383. EDN HRMKPX. (rus.).

8. Chekmareva O.V. Using a street model of an industrial city to control dust and gas emissions from road transport into the atmosphere (on the example of Orenburg). *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2005; 235-238. (rus.).

9. Giyasov B.I., Giyasov T.B. Factors affecting modern urban environment. *E3S Web of Conferences*. 2020; 217:02006. DOI: 10.1051/e3sconf/202021702006

10. Skobeleva E.A., Abramov A.V., Pilipenko O.V., Pehelenok O.A., Rodicheva M.V. Predicting the dynamics of the air environment in urban areas. *Building and Reconstruction*. 2019; 1(81):106-114. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-81-1-106-114. EDN GPZNCG. (rus.).

11. Koepke M., Monstadt J., Pilo' F., Otsuki K. Rethinking energy transitions in Southern cities: Urban and infrastructural heterogeneity in Dar es Salaam. *Energy Research & Social Science*. 2021; 74:101937. DOI: 10.1016/j.erss.2021.101937

12. Wang Q., Wang Y., Fan Y., Hang J., Li Y. Urban heat island circulations of an idealized circular city as affected by background wind speed. *Building and Environment*. 2019; 148:433-447. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.11.024

13. Sokolskaya O.N. Architectural planning tools for creating a favorable environmental situation in cities with hot-calm climatic conditions. *Bulletin of the Tajik Technical University*. 2009; 2-6(6):39-41. EDN MBHEUF. (rus.).

Received November 4, 2024.

Adopted in revised form on August 4, 2025.

Approved for publication on August 8, 2025.

14. Bashmakov I.A. Improving energy efficiency in the transport sector. *Energoberezhenie*. 2010; 1:26-33. EDN UZCZRP. (rus.).

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

16. Cheng B., Gou Z., Zhang F., Feng Q., Huang Z. Thermal comfort in urban mountain parks in the hot summer and cold winter climate. *Sustainable Cities and Society*. 2019; 51:101756. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101756

17. Konijnendijk C.C. Science for the Sustainable City: Empirical insights from the Baltimore School of Urban Ecology. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2020; 53:126737. DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126737

18. Tabunshchikov Yu.A., Shilkin N.V. Aerodynamics of high-rise buildings. *AVOK*. 2004; 8:21-23. (rus.).

19. Huang J., Gu M., Gao Y. Blockage effects on aerodynamics of isolated tall buildings under uniform turbulent flows. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021; 212:104607. DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104607

20. Kim D.A. The influence of the urban heat island on the microclimate of urbanized space. *Engineering journal of Don*. 2021; 12(84):435-445. EDN JLNMEQ. (rus.).

21. Samarin O.D. Rationing of energy consumption of the building, taking into account heat gains from solar radiation. *Housing Construction*. 2013; 1:32-33. EDN PVXZBJ. (rus.).

22. Giyasov B.I., Giyasova I.V. Regulation of air exchange in urban areas to improve their environment. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 193:01034. DOI: 10.1051/matecconf/201819301034

23. Malyavina E.G. Calculation of the air regime of multi-storey buildings with different indoor temperatures. *AVOK*. 2008; 2:40-44. EDN IJPZCZ. (rus.).

B I O N O T E S: **Botir I. Giyasov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Architectural and Construction Design; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 297626, Scopus: 57201187213, ORCID: 0000-0002-6413-1902; giyasovbi@mgsu.ru.

Доходные дома конца XIX – начала XX века как элементы жилой двухэтажной деревянной застройки Рязани

Валерия Александровна Егорова

Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета; г. Рязань, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Приведены результаты исследования доходных домов Рязани, построенных на рубеже XIX–XX вв., являющихся важными элементами историко-архитектурной среды. Строительство доходных домов повлияло на формирование нового архитектурного типа городской застройки, на улицах города появлялись как целые доходные комплексы, так и отдельные многоквартирные строения. Актуальность работы обусловлена рядом факторов: отсутствием комплексных исследований по заявленной теме; стремительным исчезновением данного типа исторической жилой архитектуры; необходимостью определения характерных особенностей рязанских двухэтажных доходных домов, являющихся элементами историко-архитектурной среды. Цель исследования заключается в изучении сохранившихся двухэтажных деревянных доходных домов, установлении их планировочных, функциональных, объемно-пространственных и архитектурно-художественных особенностей.

Материалы и методы. Для определения сохранившихся объектов проведены натурные обследования с фотофиксацией. Особенности расположения объектов в структуре застройки и взаимодействие их с окружающей архитектурно-пространственной средой позволили выявить историко-градостроительный и визуально-ландшафтный анализы. Проанализированы научные труды, архивные документы и фотоматериалы; составлены и обработаны графические материалы.

Результаты. Установлено 30 сохранившихся двухэтажных доходных домов. Комплексный анализ объектов дал возможность определить ряд характерных особенностей данного типа жилой дореволюционной архитектуры исторического центра Рязани: расположение, функционально-планировочное решение, вариативность композиций объемов и декоративного решения.

Выводы. В начале XXI в. большой процент старинной застройки Рязани был утрачен в связи со строительством новых жилых комплексов и центров различного назначения. Особенно пострадали центральные и периферийные улицы с деревянными объектами. Каждый сохранившийся элемент исторически сложившегося центра является уникальным памятником. Особую роль играют двухэтажные деревянные дома (бывшие доходные), которые несут характерные следы рязанской культуры периода XIX – начала XX в.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: доходные дома, двухэтажные деревянные дома, городская деревянная застройка, исторический центр города, объемно-планировочные решения, композиция фасадов, архитектурно-художественное оформление

Благодарности. Автор выражает благодарность редакционной коллегии, рецензентам, сотрудникам редакции за сотрудничество, внимание к данной работе и время, потраченное на изучение материалов.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Егорова В.А. Доходные дома конца XIX – начала XX века как элементы жилой двухэтажной деревянной застройки Рязани // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 10. С. 1486–1494. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1486-1494

Автор, ответственный за переписку: Валерия Александровна Егорова, EgorovaLera97@yandex.ru.

Apartment buildings of the late XIX – early XX centuries as elements of two-storey wooden buildings in Ryazan

Valeria A. Egorova

Ryazan Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University; Ryazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper presents the results of a study of Ryazan apartment buildings built at the turn of the XIX and XX centuries, which are important elements of the historical and architectural environment. The construction of apartment buildings influenced the formation of a new architectural type of urban development; both entire apartment complexes and individual multi-apartment buildings appeared on the city streets. The relevance of the work is due to a number of factors: the lack of comprehensive studies on the stated topic; the rapid disappearance of this type of historical residential architecture; the need to identify the characteristic features of Ryazan two-storey apartment buildings, which are elements of the historical and architectural environment. The purpose of the research is to study the surviving two-storey wooden apartment buildings, identify their planning, functional, volumetric-spatial and architectural-artistic features.

Materials and methods. In order to identify the surviving objects, field surveys with photo recording were conducted. The features of the location of objects in the building structure and their interaction with the surrounding architectural and spatial environment made it possible to identify historical-urban planning and visual-landscape analyses. Scientific works, archival documents and photographic materials were analyzed; graphic materials were compiled and processed.

Results. During the study, 30 surviving two-storey apartment buildings were identified. A comprehensive analysis of the objects made it possible to identify a number of characteristic features of this type of residential pre-revolutionary architecture in the historical centre of Ryazan: location, functional planning solution, variability of volume compositions and decorative solutions.

Conclusions. At the beginning of the XXI century, a large percentage of the old buildings of Ryazan were lost due to the construction of new residential complexes and centres for various purposes. The central and peripheral streets with wooden buildings suffered especially. Each preserved element of the historically formed centre is a unique monument. A special role is played by two-storey wooden houses (formerly tenement houses), which bear characteristic traces of the Ryazan culture of the period of the XIX – early XX centuries.

KEYWORDS: apartment buildings, two-storey wooden houses, urban wooden buildings, historical city centre, space-planning solutions, facade composition, architectural and artistic design

Acknowledgments. The author of the article express their sincere gratitude to the editorial board, reviewers, editorial staff for their cooperation, attention to this work and the time spent on studying the materials.

FOR CITATION: Egorova V.A. Apartment buildings of the late XIX – early XX centuries as elements of two-storey wooden buildings in Ryazan. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(10):1486-1494. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1486-1494 (rus.).

Corresponding author: Valeria A. Egorova, EgorovaLera97@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Деревянная архитектура XIX – начала XX в. являлась основой городского жилищного строительства. Разные типы жилых объектов появлялись исходя из функциональных, планировочных и конструктивных особенностей. Объемно-пространственные решения и архитектурно-композиционные приемы декора, гармонично дополненные декоративной резьбой, создавали живописные городские виды любого старинного города [1]. Стилиевые формы отделки фасадов отражают значительное разнообразие существовавших в то время эклектичных течений архитектуры. В зависимости от желаний владельцев деревянный городской дом мог быть построен в мотивах «каменного классицизма» (в отделке использовались имитации руста, балюстрады, валюты, рамочные наличники с замковыми камнями) или в формах традиционной русской избы с богатым убранством резных подзоров и причелин с набором «народных» символических орнаментов (знаки берегини, воды, солнца, земли, зооморфные и растительные мотивы).

Исторический архитектурный центр Рязани сформировался на протяжении нескольких столетий. Основная сетка улиц с преобладающей деревянной и точечной каменной застройкой сложилась после 1778 г. в период реализации екатерининского регулярного плана. В XIX в. происходило активное градостроительное развитие за счет возникновения промышленных предприятий, строительства железной дороги, прироста городского населения. Именно в это время выстраиваются главные архитектурные ансамбли исторического центра города, к которым примыкали пестрые ряды улиц с выразительными каменными особняками, деревянными усадьбами и каменно-деревянными домами с торговыми лавками [2, 3].

В первой половине XIX в. самым распространенным типом городского жилья в Рязани являлся одноэтажный дом. С развитием композиционно-планировочных решений появились объемы, дополненные мезонином или антресолями, а также каменно-деревянные дома с устройством торговых

лавок на первом этаже и жилыми комнатами на втором. Ко второй половине XIX в. определенные изменения происходят в объемно-пространственном решении и функциональном назначении городского жилья, появляются доходные дома в два этажа, выполненные преимущественно из дерева. Пространство первого и второго этажей делилось на несколько небольших квартир, с фасадов устраивались отдельные входы [4, 5]. Двухэтажные объемы удачно вписывались в уже сложившуюся уличную застройку, владельцы объектов украшали фасады внушительным количеством пропиленных орнаментов, благодаря чему объекты играли важную роль в создании живописного ансамбля улицы [6].

Сегодня существует ряд исследований, посвященных архитектуре деревянного доходного дома. В работах подчеркивается особая роль этого типа городского жилья как важного элемента градостроительной и архитектурной среды. Кандидат архитектуры И.В. Куликова отмечает, что в Томске деревянный доходный дом играет важную роль в историко-архитектурном наследии [7–9]. На возникновение данного типа городского жилья повлияли следующие факторы: проведение в 90-х гг. XIX в. великой Сибирской железнодорожной магистрали, открытие различных учебных заведений, быстрый рост городского населения. Автором составлена типология объектов на основе планировочного решения, выявлен ряд композиционных схем фасадов и варианты архитектурно-художественного оформления.

Стремительное возведение двухэтажных доходных домов со второй половины XIX в. заметно отразилось на застройке Иркутска. Несмотря на то что здесь доходные дома появились позднее, чем в Центральной России, активное строительство на рубеже XIX–XX вв. привело к их преобладающему числу над всей существующей застройкой, и в настоящее время данный тип городского жилья составляет больше половины всей исторической деревянной архитектуры. При анализе деревянных доходных домов Иркутска Е.Р. Ладейщикова выделяет несколько распространенных типов по принципу организации внутреннего пространства, расположе-

ния лестниц и входов [10]. В другом исследовании авторы (Е.В. Хохрин, А.А. Ляпин, Ю.О. Казанова) приводят классификацию доходных домов, которая основана на принципах расположения лестничных блоков относительно основного объема [11]. Применение унифицированных проектов от строительного отделения позволило стандартизировать строительные материалы, конструкции и архитектурные детали, значительно ускоряя темпы застройки. Разнообразие архитектурно-художественных приемов и методов решения фасадов было вызвано не только общими стилевыми изменениями в российской архитектуре, но и необходимостью типизации планировок для массовой застройки кварталов, полностью выгоревших летом 1879 г. [12].

Исследования доходных домов кандидата искусствоведения Ю.И. Тарасовой дали возможность выявить характерные особенности данного типа городского жилья для различных городов Западной Сибири [13, 14]. Автор отмечает, что современные модели использования доходных домов разнообразны (часть сохранила первоначальную жилую функцию; в других располагаются медицинские, административные, государственные учреждения, офисы, банки, музеи) и они оказали влияние на изменение изначальных планировок. Однако архитектурно-художественный облик большинства зданий сохранился и каждый объект является образцом и примером регионального народного зодчества [15].

На текущий момент вопросы сохранения, применения и взаимодействия исторической застройки с новыми постройками актуальны для отечественных и зарубежных исследователей. Сохранение культурного наследия (в особенности монументального) сегодня приобрело первостепенное значение, поскольку оно служит хранителем ценностей различных народов [16]. Современное строительство существенно влияет на визуальное восприятие памятников архитектуры, теряется его контекстуальность и идентичность [17, 18]. К тому же в наше время активно применяются BIM-технологии, которые позволяют с большой точностью проводить обмерные, проектные и реставрационные работы, что значительно упростило процесс воссоздания памятников архитектуры [19].

Вследствие активной застройки центральных улиц Рязани на рубеже XX–XXI вв. было утрачено более 80 % всей деревянной застройки. Сохранившиеся элементы в настоящее время — важные градоформирующие объекты исторической среды. Деревянные доходные дома являются уникальным морфотипом городского жилья конца XIX – начала XX в., их исследование и сохранение необходимо для историко-архитектурной среды города.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использованы архивные материалы, проведен библиографический анализ публикаций

результатов научных исследований отечественных и зарубежных авторов. Методы градостроительного анализа и натурных обследований с фотофиксацией позволили предметно определить количество сохранившихся объектов, их роль в формировании уличной застройки. В результате сравнительного анализа установлены отличительные особенности и черты двухэтажной деревянной застройки Рязани по отношению к объектам данной группы других городов. Итогом комплексного анализа стали разработанные графические схемы по следующим категориям: планировочное решение, объемно-пространственная композиция, конструктивные приемы, архитектурно-художественные методы отделки фасадов. Исследование дало возможность выявить важные элементы исторической среды и ареалы деревянной застройки с признаками «ансамбля». Определен ряд сохранившихся домов, обладающих признаками объектов культурного наследия, которым необходима государственная охрана.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Строительный бум второй половины XIX в. оказал большое влияние на развитие деревянной жилой застройки дореволюционной Рязани. Для сдачи комнат в аренду в разных владениях возводились деревянные жилые флигели в один этаж или с каменным жилым подвалом. Особенно участилась практика надстройки вторых этажей в уже существующих одноэтажных объемах, что позволяло собственникам увеличивать жилплощадь и сдавать квартиры или помещения (рис. 1). В конце XIX в. по соседству с одноэтажными домами зажиточных горожан, выстроенными главными фасадами вдоль красной линии улицы, появлялись крупногабаритные двухэтажные доходные дома. Владельцы старались как можно богаче украсить плоскости фасадов, для большей привлекательности выбирая самые разнообразные декоративные элементы.

К началу XX в. в городе существовало несколько доходных владений, представленных одноэтажными деревянными или каменными домами хозяев, двухэтажными объемами с квартирами для сдачи в наем, деревянными хозяйственными службами (частично сохранились городские усадьбы Юкиных, Крутицких и Соколова). Однако основной процент многоквартирного жилья составляли одноэтажные двухэтажные деревянные дома на несколько квартир, где в первых этажах селились владельцы зданий, остальные помещения сдавались в аренду (например, доходные дома А.М. Овсянникова, А. Чернавского, Н. Захарова, С. Третьякова, А.Г. Богачева, П.И. Измайлова).

На момент исследования сохранилась лишь малая часть двухэтажных доходных домов, которые за сто лет претерпели различные изменения: перепланировка бывших квартир и комнат, пристройка новых входных блоков, изменение функционально-

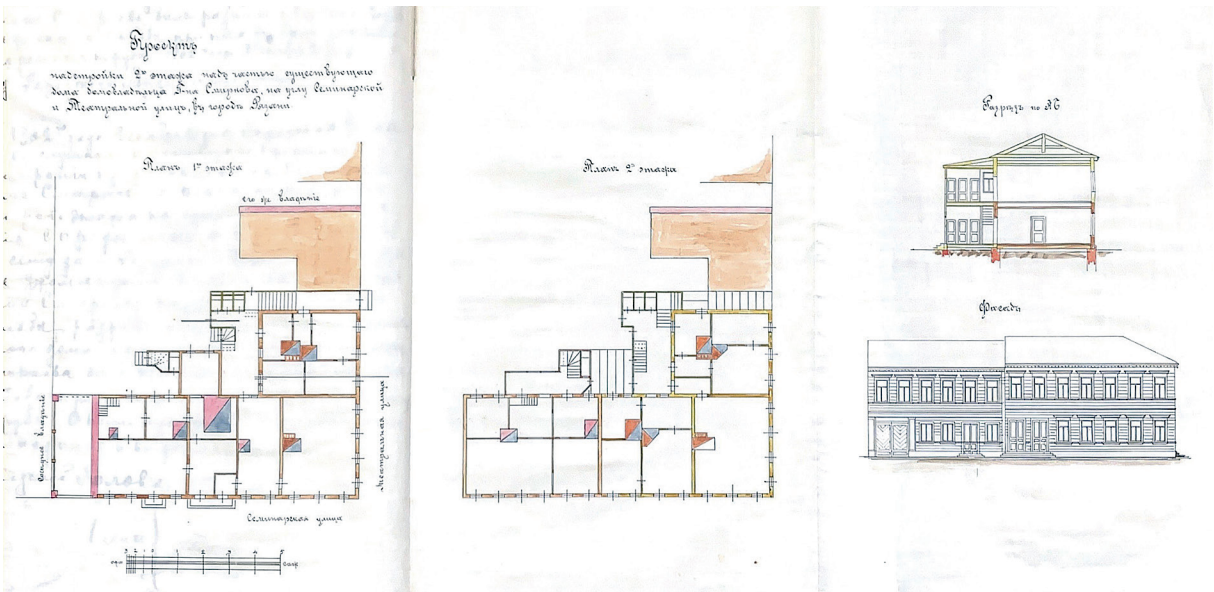


Рис. 1. Проект надстройки второго этажа над частью существующего дома домовладельца г-на Смирнова на углу Семинарской и Театральной (сейчас Петрова) улиц в г. Рязани, 1902–1903 гг. Проектные чертежи из фондов ГАРО

Fig. 1. Project for adding a second floor to part of the existing house of the homeowner Mr. Smirnov on the corner of Seminary and Teatralnaya (now Petrova) Streets in the city of Ryazan, 1902–1903 years. Design drawings from the GARO collection

го назначения. Некачественная реставрация и отсутствие ремонтных работ привели к потере значительной части архитектурно-художественного оформления во многих объектах. При этом уцелевшие памятники исторической застройки можно отнести к морфотипу жилые двухэтажные дома конца XIX – начала XX вв., которые в комплексе с другими объектами формируют единый ансамблевый комплекс исторических улиц Рязани (рис. 2).

Единственная сохранившаяся крупная доходная усадьба купцов Юкиных на ул. Павлова включает пять строений разного типа. По красной линии

улицы выстроены три дома № 11, 13, 15 (одноэтажное с кирпичным подвалом и двухэтажные корпуса) с эффектным декоративным убранством фасадов в русском стиле и мотивами, стилизованными под классицизм. Внутри усадебного участка расположены еще два объема № 11 к. 1, 15 к. 1 (одноэтажное с центральным мезонином и небольшое двухэтажное) с более скромным эклектичным декором. Объемно-планировочные решения двухэтажных домов разнообразны. На этажах размещались две, три или четыре квартиры с индивидуальным входом, в которые можно было попасть через лестничные блоки,

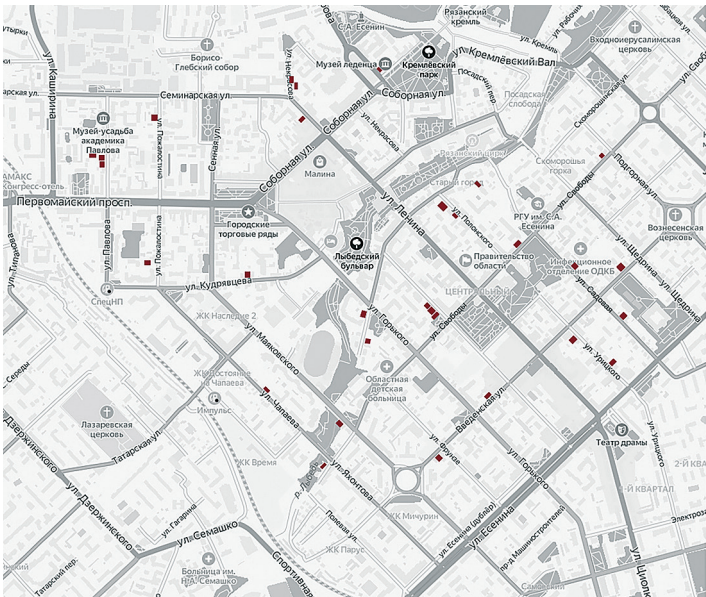


Рис. 2. Схема деревянных доходных домов Рязани, сохранившихся на момент проведения исследования (рисунок автора)

Fig. 2. Scheme of wooden apartment buildings in Ryazan, preserved at the time of the study (the author's drawing)

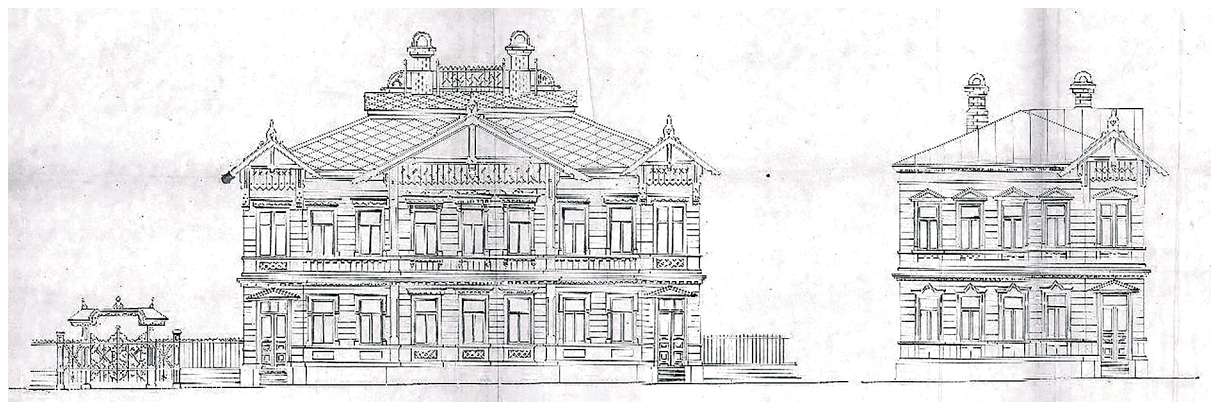


Рис. 3. Дома усадьбы Юкиных на ул. Никольской (ул. Павлова). Проектные чертежи из фондов ГАРО

Fig. 3. Houses of the Yuki estate in Nikolskaya Street (Pavlova Street). Design drawings from the GARO collection

пристроенные с флангов фасадов. Каждый из прямоугольных объемов дополнен со стороны двора двухэтажным корпусом с лестницей, который, вероятно, служил обслуживающим хозяйственным корпусом или дополнительным жилым пространством. Архитектурно-художественные решения фасадов многоквартирных домов в проектных чертежах выполнены в ярких формах русского стиля (рис. 3), но реализованы проектные предложения были частично. Главные фасады отмечены ризалитами, вертикальными лопатками, широкими межэтажными карнизами, окна обрамлены деликатными прямоугольными сандриками с пропиленной резьбой (рис. 4).

Данный объект является единственным примером доходной купеческой усадьбы с полноценно сохранившимся составом зданий. В настоящее время только два дома имеют статус объекта культурного наследия местного значения (№ 13 и 15). Все объекты — это действующее жилье, три дома (№ 11, 11 к. 1 и 15 к. 1) нуждаются в полной реставрации и возвращении исторического облика. Отсутствие охранного статуса может привести как к частичной, так и полной утрате целого ареала исторической деревянной застройки.

Еще один характерный ареал с двухэтажной деревянной застройкой (бывшие доходные дома) со-

хранился на ул. Радищева (рис. 5). Прямоугольный в плане дом С. Третьякова (№ 45) вытянут вглубь участка, узкий северный фасад в три окна и с входным блоком на левом фланге выходит на красную линию улицы. Функционально-планировочное решение сохранилось в первоначальном варианте: дом разделен на квартиры с изолированными входными блоками (с северного и восточного фасадов). Архитектурно-художественное решение главного фасада представлено богатым убранством элементов в русском стиле: центральная ось завершена фигурным кокошником в виде бочки, тимпан украшен резными лучеобразно расходящимися полотенцами; наличники окон первого этажа декорированы щипцовыми сандриками и крупными подоконными досками, укрупненные рамочные наличники второго этажа решены более скромно. Кружевные мотивы и геометрические орнаменты отражаются в пропиленных подзорах, фигурном междуэтажном пояске, рисунке фризового пространства под венчающим карнизом, боковых лопатках, наличниках окон и декоре бочкообразного кокошника.

Протяженные восьмиоконные фасады доходных домов Н. Захарова (№ 47) и А. Чернавского (№ 49) выстроены вдоль линии уличной застройки. Подобно соседнему в каждом объекте было по две



Рис. 4. Дома усадьбы Юкиных на ул. Никольской (ул. Павлова) № 13 и 15 после реставрации 2020 г. (фото автора)

Fig. 4. Houses of the Yuki estate in Nikolskaya Street (Pavlova Street) No. 13 and 15 after restoration in 2020 (the author's photo)



a



b

Рис. 5. Дома А. Чернавского, Н. Захарова, С. Третьякова на ул. Левицкой (ул. Радищева): *a* — фотография 1900–1920 гг. (скан Дмитрия Филиппова); *b* — фотография 2025 г. (фото автора)

Fig. 5. Houses of A. Chernavsky, N. Zakharov, S. Tretyakov in Levitskaya Street (Radishchev Street): *a* — photograph from 1900–1920 (scan by Dmitry Filippov); *b* — photograph from 2025 (the author's photo)

квартиры с изолированными входными блоками. Объемно-планировочное решение дома Н. Захарова включает: прямоугольную в плане просторную квартиру с большим количеством комнат, окна которых выходили на улицу; вторая небольшая квартира размещена в Г-образном крыле, выходившем во двор. В квартирах доходного дома А. Чернавского жилое пространство располагалось в центральной части (окна и парадные входы выходили на улицу), в дворовой размещался хозяйственный блок. Декоративное убранство главных фасадов выполнено в русском стиле: фигурные оконные наличники представлены сразу несколькими вариантами сандриков (прямой, щипцовый, ступенчатый); частично сохранились резные крыльца. Второй этаж дома Н. Захарова с флангов завершен пирамидальными башнями со шпильками и треугольными фронтонами, под которыми изначально устроены балконы, подобная композиция в виде выступающего треугольного фронтона с балконом была и в доме А. Чернавского, однако с течением времени эти выразительные акцентные элементы были утрачены (рис. 4). Вероятно, все три дома были одними из самых дорогих доходных владений, на что указывает расположение в центральной части города, большие квартиры в несколько комнат с отдельным входом и балконами, дорогое и выразительное убранство фасадов.

На рубеже веков активно возводились доходные дома с небольшими и недорогими квартирами в периферийной части города для малоимущих граждан, студентов и рабочих. Вытянутые прямоугольные объемы под вальмовой кровлей с планировочным решением коридорного типа (распределительный лестничный блок мог располагаться как в центральной части здания, так и с флангов) включали четное (8, 10, 12) или нечетное (9, 13) количество оконных осей. Как правило, подобные объекты не выделялись яркой художественной отделкой, фасады были лаконично украшены декоративными приемами эклектичных

направлений, а самым эффектным архитектурным элементом являлся оконный наличник. Например, декор сохранившегося доходного дома № 7 на ул. Николодворянской (построен в начале 1900-х гг.) включает: рамочные наличники с прямыми профилированными сандриками, небольшой межэтажный пояс, широкий пропиленный фриз под венчающим карнизом и тонкие ряды лопаток (рис. 6). В орнаментах четко прослеживаются геометрические рисунки и мотивы народной вышивки.

В результате исследования выявлено 30 сохранившихся двухэтажных деревянных домов с доходной функцией, каждый из которых является ярким элементом исторической застройки. Большинство объектов имеют рядовое размещение, представлены центральными фасадами вдоль красной линии улицы. В функционально-планировочных решениях определено несколько распространенных схем. В большинстве случаев встречаются дома с распределительным пространством в виде коридора и лестничной площадки, наиболее популярными были коридорный, секционный или смешанный тип. Для рязанских доходных домов характерно оформление главного уличного фасада в эклектичных формах или русском стиле. Дворовые фасады имеют более сдержанное декоративное оформление. Особую роль в архитектурно-художественном решении здания играло его расположение в структуре городских зон города (центральная, срединная, периферийная), а также соседство с архитектурными объектами, фасады которых были выполнены в разных стилевых приемах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Еще в 70-е гг. XX в. историко-архитектурная среда Рязани в большей степени состояла из жилых домов и флигелей (в один-два этажа, выполненных из камня и дерева), которые в дореволюционный период входили в состав городских усадеб дворян, чиновников, купцов, мещан или зажиточных крестьян. Длинные



а



b

Рис. 6. Доходный дом на ул. Николодворянской: *a* — фотография 1978 г. (скан из альбома-путеводителя «Времена города», 2017 г., авторы Д.А. Коновалов, В.А. Коновалов); *b* — фотография 2017 г. (фото автора)

Fig. 6. Apartment building in Nikolodvoryanskaya street: *a* — photograph from 1978 (scan from the guidebook album “Times of the City”, 2017, authors D.A. Konovalov, V.A. Konovalov); *b* — photograph from 2017 (the author’s photo)

ряды каменно-деревянных улиц, застройка площадей и старинные храмы составляли живописный ансамбль под открытым небом. К началу XXI в. большой процент старинной уличной застройки Рязани был утрачен в связи со строительством новых многоэтажных домов и центров различного назначения. В этот период особенно пострадали центральные и периферийные улицы с деревянными объектами.

Сегодня каждый элемент старинной городской застройки является уникальным памятником, который обладает как материальной, так и духовной

ценностью. Эти объекты несут своеобразные отличительные следы рязанской строительной культуры периода XIX – начала XX в. Особая ценность рязанских деревянных доходных домов заключается в сохранности самых разнообразных объектов данного морфотипа городского жилья, что позволяет в будущем провести ряд комплексных исследований с выявлением характерных особенностей по разным идентификаторам (градостроительный, архитектурно-исторический, функциональный, национально-этический, ментальный и событийный) [20].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дементьев Д.А. Особенности развития жилого деревянного зодчества России: средние века – конец XX века // *Архитектура и современные информационные технологии*. 2021. № 1 (54). С. 43–61. DOI: 10.24412/1998-4839-2021-1-43-61. EDN INWPPE.

2. Шумилкина Т.В., Егорова В.А. Архитектурные особенности формирования застройки Рязани XIX – начала XX вв. // *Приволжский научный журнал*. 2023. № 2 (66). С. 187–193. EDN XITGW.

3. Егорова В.А. Архитектурно-композиционные особенности каменно-деревянных жилых домов Рязани XIX – начала XX вв. // *Приволжский научный журнал*. 2024. № 4 (72). С. 252–257. EDN JTFLML.

4. Князева М., Евтюхина Д., Мельникова В. Рязанское деревянное зодчество как символ культурного наследия (на примере двухэтажной городской застройки XIX века) // *Проект Байкал*. 2019. Т. 16. № 61. С. 140–146. DOI: 10.7480/projectbaikal.61.1517. EDN XMDWQM.

5. Терентьева К.В., Юдаев И.А. Исследование двухэтажной деревянной застройки в городе Рязань // *Новые технологии в учебном процессе и производ-*

стве : мат. XIX Междунар. науч.-техн. конф. 2021. С. 45–46. EDN QFGKLN.

6. Варакина Г.В. «Деревянный монументализм» как феномен в архитектуре Рязани конца XIX – начала XX вв.: проблема воспроизведения элементов классицизма в дереве // *Междисциплинарные исследования в гуманитарных науках: единое пространство традиционной культуры и искусства* : II Междунар. науч. конф. 2024. С. 20–24.

7. Куликова И.В. Типы деревянных доходных домов в Томске (вторая половина XIX – начало XX в.) // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2007. № 2 (15). С. 118–126. EDN JUCZMB.

8. Куликова И.В. Фасады деревянных доходных домов в Томске рубежа XIX–XX вв. // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2010. № 4 (29). С. 63–75. EDN NAWCQL.

9. Куликова И.В. Архитектурно-композиционные элементы фасадов деревянных доходных домов в Томске рубежа XIX–XX вв. // *Вестник Томского*

государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 1 (30). С. 51–58. EDN NDXCCL.

10. Ладейщикова Е.Р. Типология жилых деревянных доходных домов Иркутска // Известия Архитектурно-этнографического музея «Тальцы». 2015. № 7. С. 221–236.

11. Хохрин Е.В., Ляпин А.А., Казанова Ю.О. Формирование типологии деревянных жилых домов Иркутска в работах исследователей архитектуры XX в. // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2013. № 1 (4). С. 180–186. EDN RAJBZR.

12. Корниенко Е.С. Деревянное зодчество Иркутска: история, классификация и современные проблемы // Вестник национального исследовательского института культурного наследия. 2024. № 4. С. 35–64. DOI: 10.24412/3034-4557-2024-4-35-64. EDN CBFAIL.

13. Тарасова Ю.И. Архитектурно-планировочные особенности доходных домов в структуре сибирского города начала XX в. (на примере Ново-николаевска) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 2 (35). С. 51–56. EDN OYATCF.

14. Тарасова Ю.И. Архитектурно-декоративное убранство доходных домов в городах Западной Сибири // Мир науки, культуры, образования. 2013. № 5 (42). С. 351–352. EDN RKNOYL.

15. Тарасова Ю.И. Современное функциональное назначение доходных домов рубежа XIX–XX столетий в городах Западной Сибири // Баландинские

чтения. 2020. Т. 15. С. 89–99. DOI: 10.24411/9999-001A-2020-10011. EDN PXSSEV.

16. Puncello I., Karwacka E. The Importance of an Integrated Historical Analysis for the Preservation of Cultural Heritage Monumental Buildings: The Case Study of Certosa Di Calci // International Journal of Architectural Heritage. 2023. Vol. 17. Issue 9. Pp. 1542–1570. DOI: 10.1080/15583058.2022.2045388

17. Kurnaz A., Aniktar S. Visual Perception and contextual relationship of contemporary extensions and historical buildings // Journal of Architectural Conservation. 2024. Vol. 30. Issue 1. Pp. 35–55. DOI: 10.1080/13556207.2024.2318923

18. Gambassi R. Identity of modern architecture in historical city environments // Architecture and Engineering. 2016. Vol. 1. Issue 2. DOI: 10.23968/2500-0055-2016-1-2-27-42

19. Bakhareva O., Kordonchik D. Investments in preservation and development of regional cultural heritage: a library of BIM elements representing national architectural and urban-planning landmarks // Architecture and Engineering. 2019. Vol. 4. Issue 3. Pp. 39–48. DOI: 10.23968/2500-0055-2019-4-3-39-48

20. Надырова Д.А. Доходные дома Старо-Татарской слободы Казани: выявление архитектурной идентичности на примере доходного комплекса Апанаевского подворья // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 4 (66). С. 143–152. DOI: 10.52409/20731523_2023_4_143. EDN IBWRAT.

Поступила в редакцию 20 мая 2025 г.

Принята в доработанном виде 23 июля 2025 г.

Одобрена для публикации 25 июля 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **Валерия Александровна Егорова** — преподаватель кафедры архитектуры, градостроительства и дизайна; **Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета**; 390000, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская, д. 26/53; SPIN-код: 7085-6353, ORCID: 0000-0002-9916-865X; egorowalera97@yandex.ru.

REFERENCES

1. Dementev D. Some features of Russian residential wooden architecture development: from middle ages to the end of the 20th century. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2021; 1(54):43-61. DOI: 10.24412/1998-4839-2021-1-43-61. EDN INWPPE. (rus.).

2. Shumilkina T.V., Egorova V.A. Architectural features of development in Ryazan in the XIX – early XX centuries. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2023; 2(66):187-193. EDN XIITGW. (rus.).

3. Egorova V.A. Architectural and composition features of stone and wooden residential buildings in Ryazan in the 19th – early 20th centuries. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2024; 4(72):252-257. EDN JTFLML. (rus.).

4. Knyazeva M., Evtyukhina D., Melnikova V. Ryazan wooden architecture as a symbol of cultural heritage (through the example of two-storey urban housing of the XIX century). *Project Baikal*. 2019; 16(61):140-146. DOI: 10.7480/projectbaikal.61.1517. EDN XMDWQM. (rus.).

5. Terent'eva K.V., Yudaev I.A. Research of two-storey wooden buildings in the city of Ryazan. *New technologies in the educational process and production : materials of the XIX International scientific and technical conference*. 2021; 45-46. EDN QFGKLN. (rus.).

6. Varakina G.V. “Wooden monumentalism” as a phenomenon in the architecture of Ryazan in the late XIX – early XX centuries: the problem of reproducing elements of classicism in wood. *Interdisciplinary*

research in the humanities: single space of traditional culture and art : II International Scientific Conference. 2024; 20-24. (rus.).

7. Kulikova I.V. Types of wooden apartment buildings in Tomsk (second half of the XIX – early XX century). *Journal of Construction and Architecture*. 2007; 2:118-126. (rus.).

8. Kulikova I.V. The facade of leased wooden houses in Tomsk on a boundary of XIX–XX centuries. *Journal of Construction and Architecture*. 2010; 4(29):63-75. EDN NAWCQL. (rus.).

9. Kulikova I.V. The facade elements of wooden lease houses in Tomsk at the turn of the XIXth–XXth centuries. *Journal of Construction and Architecture*. 2011; 1(30):51-58. EDN NDXCCL. (rus.).

10. Ladeyshchikova E.R. Typology of residential wooden tenement houses in Irkutsk. *News of the Talt-sy Architectural and Ethnographic Museum*. 2015; 7: 221-236. (rus.).

11. Khokhrin E.V., Liapin A.A., Kazanova Yu.O. Irkutsk city wooden housing typology following the 20th century architecture researchers. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost*. 2013; 1(4):180-186. EDN RAJBZR. (rus.).

12. Kornienko E.S. Wooden architecture of Irkutsk: history, classification and modern problems. *Bulletin of the National Research Institute of Cultural Heritage*. 2024; 4:35-64. DOI: 10.24412/3034-4557-2024-4-35-64. EDN CBFAIL. (rus.).

13. Tarasova Yu.I. Architectural and planning features of leased houses in the structure of Siberian city at the beginning of the XXth century (Novonikolaevsk city). *Journal of Construction and Architecture*. 2012; 2(35):51-56. EDN OYATCF. (rus.).

14. Tarasova Y.I. Architectural-decorative design of profitable houses in cities of western Siberia.

World of Science, Culture and Education. 2013; 5(42): 351-352. EDN RKNOYL. (rus.).

15. Tarasova Y.I. Modern functional purpose of the commercial apartment buildings built at the turn of the 19th and 20th centuries in the cities of the western Siberia. *Balandin Readings*. 2020; 15:89-99. DOI: 10.24411/9999-001A-2020-10011. EDN PXSSEV. (rus.).

16. Puncello I., Karwacka E. The Importance of an Integrated Historical Analysis for the Preservation of Cultural Heritage Monumental Buildings: The Case Study of Certosa Di Calci. *International Journal of Architectural Heritage*. 2023; 17(9):1542-1570. DOI: 10.1080/15583058.2022.2045388

17. Kurnaz A., Aniktar S. Visual Perception and contextual relationship of contemporary extensions and historical buildings. *Journal of Architectural Conservation*. 2024; 30(1):35-55. DOI: 10.1080/13556207.2024.2318923

18. Gambassi R. Identity of modern architecture in historical city environments. *Architecture and Engineering*. 2016; 1(2). DOI: 10.23968/2500-0055-2016-1-2-27-42

19. Bakhareva O., Kordonchik D. Investments in preservation and development of regional cultural heritage: a library of BIM elements representing national architectural and urban-planning landmarks. *Architecture and Engineering*. 2019; 4(3):39-48. DOI: 10.23968/2500-0055-2019-4-3-39-48

20. Nadyrova D.A. Commercial apartment buildings of the old Tatar quarter of Kazan: definition of architectural identity on the example of the commercial apartment complex of the Apanaevsky compound. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 4(66):143-152. DOI: 10.52409/20731523_2023_4_143. EDN IBWRAT. (rus.).

Received May 20, 2025.

Adopted in revised form on July 23, 2025.

Approved for publication on July 25, 2025.

BIONOTES: Valeria A. Egorova — Lecturer of the Department of Architecture, Urban Planning and Design; Ryazan Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University; 26/53 Pravo-Lybidskaya st., Ryazan, 390000, Russian Federation; SPIN-code: 7085-6353, ORCID: 0000-0002-9916-865X; egorowalera97@yandex.ru.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 624.042.7
DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1495-1507

Использование интегро-дифференциальных уравнений для моделирования распространения сейсмических волн через барьер с эффектом памяти

Сергей Гургенович Саиян

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается распространение сейсмических волн через барьер с эффектом памяти на основе интегро-дифференциальных уравнений. Классические волновые модели, основанные на упругих уравнениях, зачастую не учитывают вязкоупругие свойства реальных грунтов и сейсмических барьеров, обладающих способностью «запоминать» предшествующие деформации. Для более точного описания явления используется интегро-дифференциальная модель с экспоненциальным ядром памяти, позволяющая моделировать широкий спектр диссипативных эффектов и получать аналитические решения, применимые для задач сейсмической защиты.

Материалы и методы. Модель основана на интегро-дифференциальных уравнениях движения, учитывающих историю деформации и релаксацию материала. С целью получения аналитических решений применяются прямые и обратные преобразования Фурье и Лапласа. Исследованы две формы импульсов — дельта-функция и гауссов импульс.

Результаты. При дельта-импульсе в среде с памятью формируются дополнительные «хвосты» и всплески, а параметры ядра (α и β) влияют на скорость «забывания» и ее интенсивность. Для гауссова импульса при введении эффектов памяти волна плавнее «расплывается», однако также приобретает дополнительные искажения, особенно при больших значениях α и при медленном затухании памяти β . В обоих случаях показано, что, управляя величинами α и β , возможно существенно менять характер взаимодействия, получая либо резкий локальный пик, либо более сглаженное распределение с выраженным энергорассеянием.

Выводы. Проведенное исследование демонстрирует важность учета «эффекта памяти» при моделировании сейсмических барьеров. Интегро-дифференциальные уравнения с экспоненциальным ядром позволяют точнее описывать процессы затухания, рассеяния энергии и трансформации формы сейсмических волн в реальных грунтовых условиях. Полученные аналитические решения служат основой для проектирования более эффективных сейсмических барьеров, способных «настраиваться» под нужный диапазон частот колебаний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сейсмические волны, сейсмические барьеры, эффект памяти, интегро-дифференциальные уравнения, вязкоупругость, экспоненциальное ядро памяти, преобразование Лапласа, преобразование Фурье, затухание волн

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-49-02002.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Саиян С.Г. Использование интегро-дифференциальных уравнений для моделирования распространения сейсмических волн через барьер с эффектом памяти // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 10. С. 1495–1507. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1495-1507

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

Using Integro-Differential Equations to Model the Propagation of Seismic Waves Through a Barrier with a Memory Effect

Sergey G. Saiyan

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

ABSTRACT

Introduction. The present paper considers the propagation of seismic waves through a barrier with a memory effect based on integro-differential equations. Conventional wave models, founded upon elastic equations, frequently neglect the viscoelastic characteristics of actual soils and seismic barriers, which possess the capacity to “remember” prior deformations. To

achieve a more accurate description of the phenomenon, an integro-differential model with an exponential memory kernel is employed. This model allows for the modelling of a wide range of dissipative effects and the derivation of analytical solutions applicable to seismic protection problems.

Materials and methods. The model is predicated on integro-differential equations of motion, which take into account the deformation history and material relaxation. Direct and inverse Fourier and Laplace transforms are applied in order to obtain analytical solutions. Two forms of pulses are investigated: the delta function and the Gaussian pulse.

Results. In the context of a delta pulse, supplementary "tails" and bursts are formed within the medium that exhibits memory, with the kernel parameters (α and β) exerting an influence on the rate of "forgetting" and its intensity. In the case of a Gaussian pulse, the introduction of memory effects results in a more gradual blurring of the waveform, accompanied by the acquisition of additional distortions, particularly at high values of α and during slow memory decay β . It has been demonstrated that by manipulating the values of α and β , a substantial alteration in the nature of the interaction can be achieved, resulting in either a sharp local peak or a more uniform distribution, characterized by significant energy dissipation.

Conclusions. This study demonstrates the importance of taking into account the "memory effect" when modelling seismic barriers. Integro-differential equations with an exponential kernel facilitate a more precise description of the processes of attenuation, energy dissipation and transformation of seismic wave shape in real ground conditions. The analytical solutions obtained from this study form a foundation for the design of more efficient seismic barriers, capable of "tuning" to the required range of vibration frequencies.

KEYWORDS: seismic waves, seismic barriers, memory effect, integro-differential equations, viscoelasticity, exponential memory kernel, Laplace transform, Fourier transform, wave attenuation

Acknowledgements. This research was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 24-49-02002.

FOR CITATION: Saiyan S.G. Using Integro-Differential Equations to Model the Propagation of Seismic Waves Through a Barrier with a Memory Effect. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(10):1495-1507. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1495-1507 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

Для моделирования распространения волн при сейсмических воздействиях традиционно применяются классические волновые уравнения (в основном в упругой постановке без учета диссипативных свойств [1–8]). Эти модели позволяют получить представление о распространении волн в идеализированных упругих средах. Однако реальные условия вблизи поверхности Земли далеки от чисто упругих: грунты обладают вязкоупругими свойствами, а инженерные решения по созданию «сейсмических барьеров» нередко обеспечивают искусственно заданное диссипативное поведение материала или слоя.

С целью описания вязкоупругих свойств широко используют интегро-дифференциальные уравнения Больцмана – Вольтерра [9–11], включающие «эффект памяти» материала (зависимость текущих деформаций от предшествующего процесса нагружки). В большинстве современных исследований развитие получают численные методы решения (конечные разности, конечные элементы, спектральные элементы) [12–18], однако аналитические подходы для моделирования подобных явлений остаются относительно мало изученными.

Сейсмические барьеры — это специальные слои или конструкции, размещаемые в грунте либо вокруг сооружений, чтобы изменять или поглощать энергию сейсмических волн. В простейшем представлении барьер трактуется как материал с отличающимися от окружающей среды физико-механическими характеристиками (например, отличающейся скоростью распространения волны в среде или повышенным затуханием).

В работах [18–23] развивается идея применения интегро-дифференциальных уравнений для описания вязкоупругих эффектов и свойств рассе-

яния энергии в средах с «эффектом памяти». Суть подхода в том, что уравнения движения содержат дополнительные термины свертки с некоторым «ядром памяти», которое может иметь экспоненциальный, степенной или более сложный вид. Например, в экспоненциальном ядре память наиболее ярко проявляется на относительно «средних» промежутках времени, а при длительном воздействии вклад ядра уменьшается.

В реальных условиях вязкоупругость барьера может существенно влиять на рассеяние и затухание сейсмических волн. Так, введение «памяти» в модель приводит к дополнительным механизмам энергорассеяния (гистерезис, дисперсия, задержки во времени). Это особенно актуально при анализе поверхностных волн, которые распространяются в приповерхностных слабых породах и сильно влияют на механическую безопасность зданий и сооружений. В теории волновой динамики подобные модели обладают несколькими важными преимуществами: они позволяют учесть более сложные механизмы диссипации, чем классический коэффициент вязкости, временную дисперсию в широком спектре частот, а также точнее описывать форму волны для импульсных воздействий. Несмотря на сложность получения аналитических решений, они обеспечивают глубокое понимание принципов формирования и распространения волн, помогают выявлять зоны усиленного затухания. Кроме того, такие решения дают возможность выводить простые асимптотические формулы для больших расстояний или больших моментов времени, что важно при расчетах и разработке мер сейсмической защиты масштабных инфраструктурных объектов, а также служат эталонными решениями для верификации программных комплексов (ANSYS, ABAQUS, NASTRAN и др.).

Преимущества интегро-дифференциальных моделей сейсмических барьеров заключаются в том, что возможен точный учет наследственных свойств, а также адекватное описание волнового затухания и рассеяния энергии. При описании реальных барьерных материалов (естественные грунты или искусственно созданные слои) невозможно свести вязкоупругость к простому коэффициенту демпфирования. Интегральный оператор вносит память, позволяя учесть весь предшествующий ход деформаций. Если традиционные упругие модели описывают лишь отражение и преломление волн, то модели с памятью дают возможность также учитывать диссипацию энергии, зависящую от частоты и амплитуды. При этом эффект памяти проявляется лишь при определенных свойствах материала барьера: в предельных случаях практически полностью упругого поведения или, наоборот, мгновенной вязкоупругой релаксации («быстрого забывания»), предыдущие деформации почти не влияют на текущую волну.

С точки зрения инженерии возможность «тонкой настройки» параметров памяти открывает путь к созданию материалов и слоев, эффективно гасящих колебания в широком диапазоне частот. Барьер становится «настраиваемым» элементом системы сейсмической защиты. Несмотря на то, что классические волновые модели для упругой среды хорошо известны и эффективно решаются численно, переход к более сложным интегро-дифференциальным уравнениям с эффектом памяти требует дальнейшей проработки аналитического инструментария, особенно если речь идет о теоретической оценке влияния барьера на сейсмические волны. Методы решения на основе преобразований Фурье и Лапласа позволяют получать замкнутые выражения для амплитудных и фазовых характеристик волн, определять «зоны теней» с ослабленными колебаниями и прогнозировать влияние неоднородностей.

В контексте научного анализа и инжиниринга интегро-дифференциальные модели барьеров с па-

мятью пока не получили столь широкого применения, как классические уравнения линейно-упругой или простейшей вязкоупругой теории. Однако их потенциал, заключающийся в более точном описании механики и динамики волнового процесса, очевиден. В совокупности с современными вычислительными возможностями и аналитическими методами такие модели способны существенно улучшить прогнозную оценку ожидаемых сейсмических воздействий на здания и сооружения.

Таким образом, дальнейшее развитие аналитических подходов, специализированных вычислительных алгоритмов и экспериментальных методов в области интегро-дифференциальных уравнений с ядром памяти позволит расширить научные и инженерные возможности в задаче повышения сейсмостойкости зданий и сооружений. В рамках настоящего исследования разработано и проанализировано замкнутое аналитическое решение, описывающее распространение сейсмических волн через барьер с эффектом памяти для дельта-импульса и гауссова импульса на основе интегро-дифференциальных уравнений, а также преобразований Фурье и Лапласа. В статье приведена подробная постановка, включающая экспоненциальное ядро памяти и теоретические выкладки. Исследовано влияние параметров памяти на динамику решения, а также асимптотики и потенциальные приложения для сейсмических барьеров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Постановка задачи. Рассмотрим одномерную модель распространения сейсмической волны в упругом полупространстве, модифицированном специальным сейсмическим барьером. Пусть $u(x, t)$ — смещение грунта в точке x в момент времени t . Сейсмический барьер обладает вязкоупругими свойствами «с памятью», приводящими к интегральному члену в уравнении (1). Предположим, что параметры среды постоянны: плотность $\rho > 0$, модуль деформации $E > 0$. Для простоты примем, что внеш-

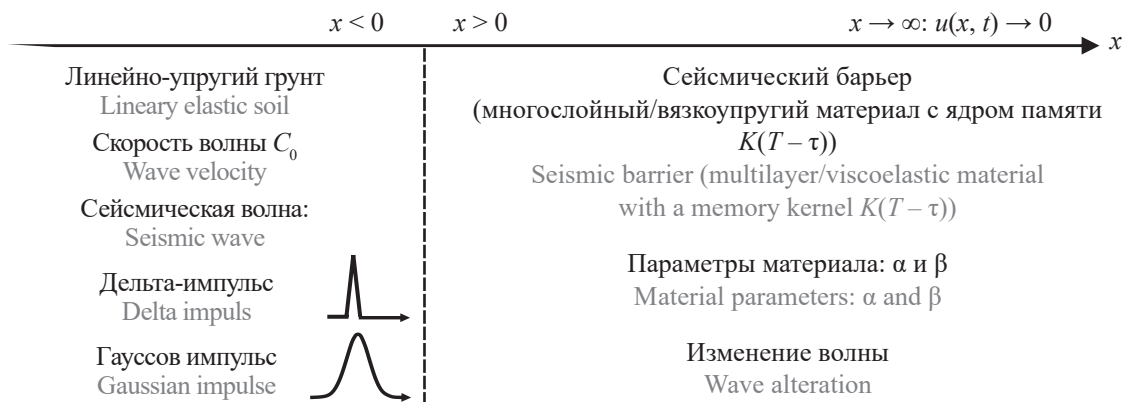


Рис. 1. Модель распространения сейсмической волны в упругом полупространстве, модифицированном специальным сейсмическим барьером с эффектом памяти при действии дельта-импульса и гауссова импульса

Fig. 1. The model of seismic wave propagation in an elastic half-space modified by a special seismic barrier with a memory effect under the action of delta and Gaussian impulses

него источника возмущения нет, $S(x, t) = 0$, а все воздействие исходит от начальных условий. Постановка такой задачи показана на рис. 1.

Основные уравнения. Основным разрешаемым уравнением является уравнение колебаний, содержащее интегральный член, описывающий ядро памяти материала, отражающий интегральный вклад всех предыдущих состояний системы. В контексте сейсмического барьера это может быть описанием вязкоупругого или многослойного материала, у которого реакция зависит от предыстории деформаций. Разрешающее уравнение выглядит следующим образом:

$$\rho \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left[E \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right] - \int_0^t K(t - \tau) u(x, \tau) d\tau + S(x, t), \quad (1)$$

где ρ — плотность грунта; E — обобщенный модуль деформаций; $K(t - \tau)$ — ядро памяти; $S(x, t)$ — внешняя сейсмическая нагрузка (например, сейсмическая волна, пришедшая от очага землетрясения). Для простоты примем, что внешнего источника возмущения нет, $S(x, t) = 0$, а все воздействие исходит от начальных условий.

Данное интегро-дифференциальное уравнение позволяет учитывать не только мгновенную реакцию грунта и барьера на сейсмическое возмущение, но и накопленный эффект за все предшествующее время. Это важно для прогнозирования затухания и отражения сейсмической энергии с учетом сложной структуры барьера, что в итоге повышает точность оценки динамики вибрационных процессов в зоне действия защитных барьерных конструкций.

Ядро памяти материала. Для ядра памяти материала был рассмотрен экспоненциальный вид [24, 25]:

$$K(t - \tau) = \alpha \cdot \exp(-\beta(t - \tau)), \quad (2)$$

где $\alpha > 0$, $\beta > 0$ — параметры ядра памяти материала. Это ядро памяти означает, что материал «забывает» прошлые деформации экспоненциально быстро с характерным временем $1/\beta$. Параметр α определяет интенсивность памяти. Отметим, что выбранное экспоненциальное ядро памяти основано на классической модели вязкоупругости (уравнение типа Вольтерра), что обосновывает его применение в данной модели [26].

Безразмерные параметры. Для удобства дальнейших теоретических выкладок все физические величины были обезразмерены:

$$t' = \frac{t}{T_0}; \quad x' = \frac{x}{L_0}; \quad u' = \frac{u}{L_0}; \quad (3)$$

$$\alpha' = \alpha T_0^3; \quad \beta' = \beta T_0; \quad k' = k L_0; \quad s' = s T_0,$$

где масштаб времени (T_0) и длины (L_0) определяется так, чтобы скорость звука $c_0 = \frac{L_0}{T_0} = 1$ в безразмерных переменных, таким образом, $L_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} T_0 = c_0 T_0$,

k' — безразмерное волновое число $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ — длина волны; s' — безразмерная частота; α' и β' — безразмерные константы материала. При дальнейших выкладках (до момента перехода к размерным величинам) штрихи во всех функциях будут опущены.

Начальные условия. Начальные условия зададим в классической форме:

$$u(x, 0) = f(x); \quad \frac{\partial u(x, 0)}{\partial t} = g(x). \quad (4)$$

Преобразование Лапласа. Обозначим преобразование Лапласа по переменной t , второй производной по времени и интегрального члена [27]:

$$L\{u(x, t)\} = U(x, s) = \int_0^\infty u(x, t) \exp(-st) dt;$$

$$L\{u_{tt}\}(x, s) = s^2 U(x, s) - sf(x) - g(x); \quad (5)$$

$$L\left\{\int_0^t \alpha \cdot \exp(-\beta(t - \tau)) \cdot u(x, \tau) d\tau\right\} =$$

$$= \alpha U(x, s) \frac{1}{s + \beta}.$$

Подставляя в исходное уравнение (1), получим:

$$\rho [s^2 U(x, s) - sf(x) - g(x)] =$$

$$= E \frac{\partial^2 U(x, s)}{\partial x^2} - \frac{\alpha}{s + \beta} U(x, s). \quad (6)$$

Преобразование Фурье. Далее применим преобразование Фурье по пространственной переменной x [28]:

$$\hat{U}(k, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(x, s) \exp(-ikx) dx. \quad (7)$$

Аналогично для функций $\hat{f}(k)$ и $\hat{g}(k)$. Пространственный дифференциальный оператор второго порядка переходит в вид $E \frac{\partial^2 U(x, s)}{\partial x^2} \xrightarrow{\mathcal{F}} -Ek^2 \hat{U}(k, s)$, где $\hat{U}(k, s)$ — Фурье – Лапласово изображение функции $u(x, t)$.

Трансформированное уравнение. Подставим в трансформированное уравнение (6) с учетом преобразований:

$$\rho [s^2 \hat{U}(k, s) - s\hat{f}(k) - \hat{g}(k)] =$$

$$= -Ek^2 \hat{U}(k, s) - \frac{\alpha}{s + \beta} \hat{U}(k, s). \quad (8)$$

Собрав все члены с $\hat{U}(k, s)$, получим:

$$\hat{U}(k, s) = \frac{\rho [s\hat{f}(k) + \hat{g}(k)]}{\rho s^2 + Ek^2 + \frac{\alpha}{s + \beta}}. \quad (9)$$

Обратные преобразования Лапласа и Фурье. Полученное выражение дает решение в преобразо-

ванном виде. Чтобы вернуть $u(x, t)$, нужно выполнить обратное преобразование Лапласа [29] и Фурье [30]:

$$U(x, s) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{U}(k, s) \exp(ikx) dk, \quad (10)$$

затем:

$$u(x, t) = L_s^{-1} \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\rho \left[s \hat{f}(k) + \hat{g}(k) \right]}{\rho s^2 + E k^2 + \frac{\alpha}{s + \beta}} \exp(ikx) dk \right\}. \quad (11)$$

Процедура обратного преобразования в общем случае сложна, но при конкретном выборе начальных условий $f(x)$ и $g(x)$, а также параметров α, β, E, ρ может быть упрощена или сводится к табличным интегральным преобразованиям. Например, для гармонических по пространству начальных возмущений (типа $f(x) = \exp(-x^2)$) или дельта-функциональных условий ($f(x) = \delta(x)$) решение может быть найдено в приближенном виде через интегрирование по контуру и применение известных формул обратных преобразований Фурье и Лапласа.

Изучим знаменатель выражения для $\hat{U}(k, s)$ при единичных константах материала. Для обратного преобразования Лапласа нужно исследовать корни по s . Умножим на $s + \beta$:

$$(s + \beta)(s^2 + k^2) + \alpha = s^3 + \beta s^2 + k^2 s + \beta k^2 + \alpha. \quad (12)$$

Корни этого кубического уравнения по s определяют моды затухания и осцилляций.

Частные случаи и упрощения. Приведем некоторые частные случаи и упрощения:

1. Если $\alpha = 0$, тогда после обратного преобразования Лапласа и Фурье получаем классическое волновое решение (что следует также при подстановке в уравнение).

С памятью наблюдается отступление от классического сценария распространения: волна менее четко распадается на бегущие фронты, проявляя диссипативный характер. Большая α усиливает память: волна сильнее затухает и «размывается».

2. При малых, но ненулевых α , добавляется член $\frac{\alpha}{s + \beta}$, и в разложении по α появляются затухающие поправки. Можно строго показать, что эти поправки приводят к уменьшению амплитуды волн с ростом t .

3. Если β очень велико ($\beta \rightarrow \infty$), то для умеренных s память исчезает сразу, поскольку $\lim_{\beta \rightarrow \infty} \frac{\alpha}{s + \beta} \approx 0$. Это соответствует быстрому исчезновению памяти (мгновенная релаксация), приближая задачу к упругой. Формально можно разложить при больших β в виде:

$$\frac{\alpha}{s + \beta} = \frac{\alpha}{\beta} \frac{1}{1 + \frac{s}{\beta}} \approx \frac{\alpha}{\beta} \left(1 - \frac{s}{\beta} + \dots \right).$$

4. При $\beta \rightarrow \infty$, $\frac{\alpha}{\beta} \rightarrow 0$.

5. Если α велика и β мала, материал долго «помнит» деформации, что приводит к значительно

более медленному распространению и сильному затуханию волны.

Изучая поведение решения при изменении параметров системы, можно понять, какие режимы доминируют: затухающие, колебательные или квазистатические.

Приведем некоторые частные решения. При начальных условиях $u(x, 0) = f(x) = \exp(-x^2)$, $\frac{\partial u(x, 0)}{\partial t} = g(x) = 0$. Гауссов импульс удобен для аналитического рассмотрения, поскольку преобразование Фурье гауссовой функции хорошо известно $\hat{f}(k) = \sqrt{\pi} \cdot \exp\left(-\frac{k^2}{4}\right)$ [28]. Тогда при гауссовом импульсе и безразмерных параметрах материала:

$$\hat{U}(k, s) = \frac{s \sqrt{\pi} \cdot \exp\left(-\frac{k^2}{4}\right)}{s^2 + k^2 + \frac{\alpha}{s + \beta}}.$$

При начальных условиях дельта-функции $f(x) = \delta(x)$ ($\hat{f}(x) = 1$) и $g(x) = 0$ функция примет вид:

$$\hat{U}(k, s) = \frac{s}{s^2 + k^2 + \frac{\alpha}{s + \beta}}.$$

Дельта-функция упрощает анализ, потому что можно трактовать это как фундаментальное решение (функция Грина) задачи [31]. Детальный анализ особенностей в s -плоскости позволит описать эволюцию единичного импульса и определить, с какой скоростью он затухает и расширяется.

Случай начального дельта-импульса. Проведем обратное преобразование Фурье для функции $\hat{U}(k, s)$, соответствующее начальному дельта-импульсу. Рассмотрим фиксированный s и выполним обратное преобразование Фурье по k . Выполним замену $A(s) = s^2 + \frac{\alpha}{s + \beta}$, где $a = \sqrt{A(s)}$, и применив стандартную пару Фурье¹, получим:

$$F_{k \rightarrow x}^{-1} \left\{ \frac{1}{k^2 + A(s)} \right\} = s \frac{1}{2\sqrt{A(s)}} \exp\left(-|x| \sqrt{A(s)}\right). \quad (13)$$

Таким образом, после обратного преобразования Фурье:

$$U(x, s) = \frac{s}{2\sqrt{s^2 + \frac{\alpha}{s + \beta}}} \exp\left(-|x| \sqrt{s^2 + \frac{\alpha}{s + \beta}}\right). \quad (14)$$

Теперь необходимо осуществить обратное преобразование Лапласа s по t . Прямое аналитическое выражение в элементарных или стандартных специальных функциях без интеграла не получить. Поэтому рассмотрим разложение в ряд по малому

¹ Porscha McRobbie, Eitan Geva (2011). Fourier Transform Pairs // Wolfram Demonstrations Project. URL: demonstrations.wolfram.com/FourierTransformPairs/

параметру α , предполагая α достаточно малым. Такой подход даст нам приближенное аналитическое решение для $u(x, t)$. Для этого рассмотрим подкоренной аргумент и введем малый параметр α и представим $\frac{\alpha}{s+\beta}$ как «малое возмущение», поскольку s^2 — доминирующий член. Разложение экспоненты для малой α , используя $\exp\left(-|x|\frac{\alpha}{2(s+\beta)}\right) \approx 1 - \frac{|x|\alpha}{2(s+\beta)}$ и комбинируя результаты:

$$U(x, s) \approx \left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{4s(s+\beta)}\right) \exp(-|x|s) \left(1 - \frac{|x|\alpha}{2(s+\beta)}\right). \quad (15)$$

Перемножая и сохраняя члены до первого порядка по α , получим:

$$U(x, s) \approx \frac{1}{2} \exp(-|x|s) - \frac{|x|\alpha}{4(s+\beta)} \exp(-|x|s) - \frac{\alpha}{4s(s+\beta)} \exp(-|x|s). \quad (16)$$

Обратное преобразование Лапласа для восстановления функции $u(x, t)$ производится также по частям:

$$\begin{aligned} L_s^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \exp(-|x|s) \right\} (t) &= \frac{1}{2} \delta(t - |x|); \\ L_s^{-1} \left\{ -\frac{|x|\alpha \exp(-|x|s)}{4(s+\beta)} \right\} (t) &= \\ &= -\frac{|x|\alpha}{4} \exp(-\beta(t - |x|)) H(t - |x|); \\ L_s^{-1} \left\{ -\frac{\alpha}{4s(s+\beta)} \exp(-|x|s) \right\} (t) &= \\ &= -\frac{\alpha}{4\beta} [H(t - |x|) - \exp(-\beta(t - |x|)) H(t - |x|)]. \end{aligned} \quad (17)$$

Тогда итоговое выражение для $u(x, t)$ примет вид:

$$u(x, t) = \frac{1}{2} \delta(t - |x|) - \alpha \left[\frac{|x|}{4} \exp(-\beta(t - |x|)) H(t - |x|) + \frac{1}{4\beta} [1 - \exp(-\beta(t - |x|)) H(t - |x|)] \right] + O(\alpha^2), \quad (18)$$

где выражение $t - |x|$ (на самом деле $t' - |x|$) выражается в размерных параметрах:

$$t' - |x| = \frac{t}{T_0} - \frac{|x|}{L_0} = \frac{t}{T_0} - \frac{|x|}{c_0 T_0} = \frac{t - \frac{|x|}{c_0}}{T_0}, \text{ где } \frac{|x|}{c_0} \text{ — физическое время, за которое фронт волны, движущийся со скоростью } c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \text{ достигает точки, отстоящей от источника на расстояние } |x|. \text{ В исходных размерных уравнениях именно этот масштаб времени определяет, в какой момент фронт приходит в точку пространства.}$$

Случай начального гауссова импульса. Для функции с гауссовым импульсом представление дробной части возможно через контурный интеграл. Обозначим $M = s^2 + \gamma = s^2 + \frac{\alpha}{s+\beta}$ и $\gamma = \frac{\alpha}{s+\beta}$, тогда интеграл обратного преобразования Фурье примет вид:

$$U(x, s) = \frac{s\sqrt{\pi}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp\left(-\frac{k^4}{4}\right) \cdot \exp(ikx)}{k^2 + M} dk. \quad (19)$$

Экспоненциальный множитель $\exp\left(-\frac{k^4}{4}\right)$ быстро убывает при больших k , указывает на гладкость обратного преобразования. Основной вклад в интеграл вносит область $|k| \sim 0$.

Решение будет производиться на основе теории вычетов. Функция имеет полюса, обусловленные знаменателем $k^2 + M = 0$, имеющим корни $k_{1,2} = \pm i\sqrt{M} = \pm i\sqrt{s^2 + \gamma}$. Замыкаться контур интегрирования будет в верхней полуплоскости, если $x > 0$, и в нижней полуплоскости, если $x < 0$. Это связано с фактором $\exp(ikx)$, обеспечивающим затухание интеграла на соответствующем дуговом контуре при больших $|k|$.

Рассмотрим для случая, когда $x > 0$. Используем теорему Коши для замкнутого контура. Вычет в точке $k = i\sqrt{M}$:

$$\begin{aligned} \text{Res} &= \lim_{k \rightarrow i\sqrt{M}} (k - i\sqrt{M}) \frac{\exp\left(-\frac{k^4}{4}\right) \cdot \exp(ikx)}{k^2 + M} = \\ &= \frac{\exp\left(-\frac{M^2}{4}\right) \cdot \exp(-\sqrt{M}x)}{2i\sqrt{M}}. \end{aligned} \quad (20)$$

Обратное преобразование Фурье для случая, когда $x > 0$ (аналогичные преобразования и для $x < 0$):

$$\begin{aligned} U(x, s) &= \frac{s\sqrt{\pi}}{2\pi} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{M}} \exp\left(-\frac{M^2}{4}\right) \exp(-\sqrt{M}x) = \\ &= \frac{s\sqrt{\pi}}{2\sqrt{M}} \exp\left(-\frac{M^2}{4}\right) \exp(-\sqrt{M}x). \end{aligned} \quad (21)$$

При объединении результатов для $x > 0$ и $x < 0$ можно заметить, что $\exp(\sqrt{M}x)$ при $x < 0$ можно переписать как $\exp(-\sqrt{M}|x|)$, а при $x > 0$ аналогично $\exp(-\sqrt{M}x) = \exp(-\sqrt{M}|x|)$. Тогда итоговую формулу для обратного преобразования Фурье (с подстановкой $M = s^2 + \frac{\alpha}{s+\beta}$) возможно представить в единой форме:

$$\begin{aligned} U(x, s) &= \frac{s\sqrt{\pi}}{2\sqrt{s^2 + \frac{\alpha}{s+\beta}}} \exp\left(-\frac{\left(s^2 + \frac{\alpha}{s+\beta}\right)^2}{4}\right) \times \\ &\times \exp\left(-\sqrt{s^2 + \frac{\alpha}{s+\beta}} |x|\right). \end{aligned} \quad (22)$$

Обратное преобразование Лапласа определяет-ся как:

$$u(x, t) = L_s^{-1}[U(x, s)](t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma-\infty}^{\gamma+\infty} \frac{s\sqrt{\pi}}{2\sqrt{M}} \exp\left(-\frac{M^2}{4}\right) \times \exp(-\sqrt{M}|x|) \exp(st) ds, \quad (23)$$

где γ — линия интегрирования в правой полуплоскости комплексной плоскости s .

Функция $M = s^2 + \frac{\alpha}{s+\beta}$ сложна для прямого обращения. Разложим ее по степеням $\frac{\alpha}{s+\beta}$, предполагая, что $\frac{\alpha}{s+\beta}$ мала при больших s , и подставив данное разложение в уравнение (22):

$$U(x, s) \approx \frac{s\sqrt{\pi}}{2\sqrt{s^2 + \frac{\alpha}{\beta}}} \exp\left(-\frac{(s^2 + \frac{\alpha}{\beta})^2}{4}\right) \exp\left(-\sqrt{s^2 + \frac{\alpha}{\beta}}|x|\right). \quad (24)$$

В приближенном уравнении (24) $\exp\left(-\frac{(s^2 + \frac{\alpha}{\beta})^2}{4}\right)$ подавляет вклад при больших s , но малый s может быть доминирующим. Основной вклад в $u(x, t)$ дает экспонента $\exp\left(-\sqrt{s^2 + \frac{\alpha}{\beta}}|x|\right)$. При $\sqrt{s^2 + \frac{\alpha}{\beta}} \approx s + \frac{\alpha}{2s}$ получим следующее выражение для обратного преобразования Лапласа:

$$L_s^{-1}\left[\exp(-|x|s) \cdot \exp\left(-\frac{|x|\frac{\alpha}{2\beta}}{s}\right)\right](t), \quad (25)$$

тогда итоговое выражение для $u(x, t)$ имеет вид:

$$u(x, t) = \frac{1}{4\sqrt{\pi t^3}} \exp\left(-\frac{(|x-t|\frac{\alpha}{2\beta})}{4t} - (x-t)^2 t\right) + O(\alpha^2), \quad (26)$$

где выражение $|x-t|$ (на самом деле $|x'-t'|$) выражается в размерных параметрах $|x'-t'| = |x - c_0 t|$.

Таким образом, получены выражения для безразмерных $u(x, t)$ на основе интегро-дифференциальных моделей распространения сейсмических волн через барьер с эффектом памяти для случая гауссова импульса и дельта-импульса.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Случай начального дельта-импульса. На рис. 2 показана временная эволюция амплитуды сейсмической волны, распространяющейся через барьер с эффектом памяти. Волна задана в виде дельта-импульса в начальный момент времени, и на графике представлены ее формы при нескольких фиксированных временах распространения. Каждый цвет соответствует разному моменту времени ($t = 2$; 4; 6 и 8 с). Параметры материала: $c_0 = 600$ м/с; $\alpha = 1,0$ 1/с³; $\beta = 0,2$ 1/с.

На самых ранних временных промежутках видно формирование острой, почти сингулярной

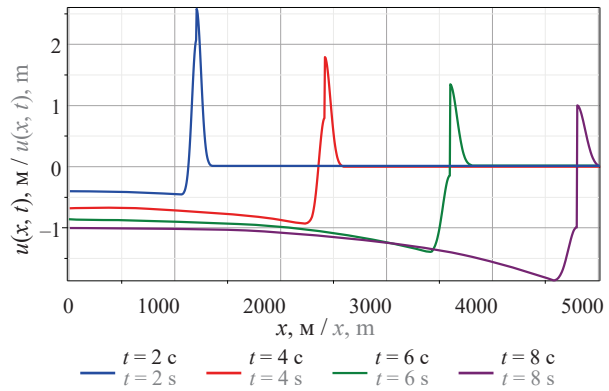


Рис. 2. Распространение сейсмической волны (при начальном дельта-импульсе) через барьер с эффектом памяти при разных моментах времени. Параметры материала: $c_0 = 600$ м/с; $\alpha = 1,0$ 1/с³; $\beta = 0,2$ 1/с

Fig. 2. Propagation of a seismic wave (under an initial delta impulse) through a barrier with a memory effect at different moments in time. Material parameters: $c_0 = 600$ m/s; $\alpha = 1.0$ 1/s³; $\beta = 0.2$ 1/s

вершины волны — это следствие того, что в начальный момент была задана дельта-функция, распространяющаяся с постоянной скоростью c_0 от точки возбуждения. С увеличением времени главный пик смещается вправо, соответствуя движению фронта волны по оси x .

Классическое уравнение волн без ядра памяти позволяет получать относительно простую картину распространения — амплитуда основного фронта со временем ослабевала бы или оставалась постоянной, но не вызвала дополнительных сложных структур. Наличие памяти в модели, заданной интегро-дифференциальными соотношениями, учитывающими «предыдущие состояния» деформации среды, приводит к появлению более сложных форм сигналов: на графике видны дополнительные всплески и затухающие «хвосты» за основным фронтом волны, что вызывает дополнительные пиковые возмущения и неоднородности в волновой форме.

На рис. 3 показано распространение сейсмического дельта-импульса через барьер с эффектом памяти в фиксированный момент времени ($t = 4$ с) для разных наборов параметров ядра памяти α и β . Они определяют, как волна «помнит» свое прошлое состояние и как быстро эта память затухает со временем.

Увеличение α усиливает проявление памяти. Сравним случаи равной β , но разной α (на рис. 3 соответствует синему и красному графикам). При более высокой α (красный график) амплитуда возмущений значительно сильнее: кривая уходит гораздо ниже нуля слева от барьера и при подъеме у барьера формируется более резкий скачок. Иными словами, повышенное значение α усиливает влияние прошлых состояний деформации среды, в результате чего волна приобретает более неоднородный, «рваный» характер.

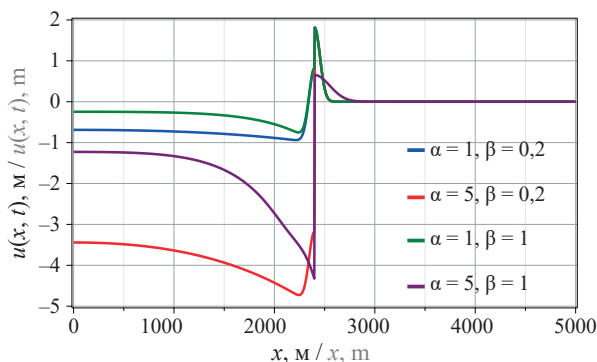


Рис. 3. Распространение сейсмической волны (при начальном дельта-импульсе) через барьер с эффектом памяти в момент времени $t = 4$ с при разных параметрах ядра памяти $K(t - \tau)$. Параметры материала: $c_0 = 600$ м/с

Fig. 3. Propagation of a seismic wave (under an initial delta impulse) through a barrier with a memory effect at time $t = 4$ s for different memory kernel parameters $K(t - \tau)$. Material parameters: $c_0 = 600$ м/с

Параметр β отвечает за скорость затухания «памяти» во времени. Сравним случаи равной α , но разной β (на рис. 3 соответствует синему и зеленому графикам). С увеличением β форма волны становится более локализованной возле барьера: появляется более выраженный пик, за которым следует относительно резкий спад. Иными словами, более высокая β усиливает эффект концентрации возмущения вблизи точки барьера, делая картину распределения волны более контрастной.

Рассмотрим фиолетовую линию ($\alpha = 5, \beta = 1$), где оба параметра велики. Здесь наблюдаются сильный пик в области барьера и выраженные отрицательные значения смещения слева. Это указывает на то, что при сильном эффекте памяти (при больших α) и быстрой ее «реализации» или «затухании» (при больших β) волна испытывает мощную локальную деформацию, материал «откликается» на прошлое состояние особенно резко и концентрировано.

Представленный график демонстрирует, что параметры α и β существенно влияют на форму сейсмической волны при прохождении через барьер с памятью. Повышение α приводит к более сильным, неоднородным возмущениям, а увеличение β фокусирует эти возмущения в более узкой области около барьера, создавая резкие скачки амплитуды. Таким образом, регулируя α и β , можно контролировать степень и характер деформаций волны при ее взаимодействии с барьером, учитывая прошлые состояния сред.

Случай начального гауссова импульса. На рис. 4 показан график распространения сейсмической волны, заданной в форме гауссова импульса, через барьер с эффектом памяти. Изображены четыре момента времени (при $t = 0,05; 0,1; 0,15$ и $0,2$ с). Параметры материалов заданы таким образом, чтобы скорость распространения волны в рассматриваемой

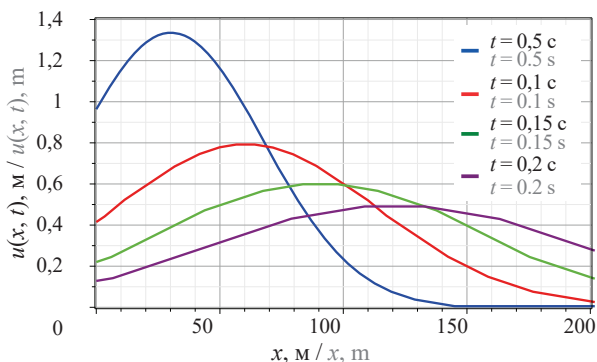


Рис. 4. Распространение сейсмической волны (при начальном гауссовом импульсе) через барьер с эффектом памяти при разных моментах времени. Параметры материала: $c_0 = 600$ м/с; $\alpha = 1,0$ 1/с³; $\beta = 0,1$ 1/с

Fig. 4. Propagation of a seismic wave (under an initial Gaussian impulse) through a barrier with a memory effect at different moments in time. Material parameters: $c_0 = 600$ м/с; $\alpha = 1.0$ 1/с³; $\beta = 0.1$ 1/с

мой среде была $c_0 = 600$ м/с. Параметры ядра памяти $\alpha = 1,0$ 1/с³; $\beta = 0,1$ 1/с.

Вместо жесткой сингулярной вершины, как у дельта-импульса, исходная волна имеет плавный гауссов профиль. Это приводит к более мягкому характеру распространения. На начальных этапах ($t = 0,05$ с) волна довольно сильно проявлена и имеет четко выраженный максимум.

По мере увеличения времени ($t = 0,1; 0,15; 0,2$ с) гауссов импульс постепенно смещается вдоль оси x и немного «расплывается» — амплитуда уменьшается, фронт волны становится шире. Это отражает распространение упругой деформации через барьер, причем эффект памяти среды приводит к тому, что волна не просто равномерно расплывается, как это было бы в чисто упругом случае без памяти, а может испытывать более сложные деформации формы.

Примененные параметры ($\alpha = 1,0, \beta = 0,1$) дают умеренный эффект памяти. Поскольку $\beta = 0,1$ относительно невелика, затухание памяти идет медленнее, чем при больших β . Это означает, что прошлые состояния среды влияют на текущее распространение более мягко и дольше во времени. В результате волна не приобретает резких всплесков или резких асимметрий, а напротив — сохраняет достаточно гладкую форму, хотя со временем слегка асимметрично искажается.

На рис. 5 приведен график распределения амплитуды сейсмической волны, заданной гауссовым импульсом, в фиксированный момент времени $t = 0,05$ с. Сравниваются разные варианты параметров ядра памяти α и β .

Исследовано влияние параметров α и β . При переходе от $\alpha = 0,1$ (зеленая кривая) к $\alpha = 1$ (синяя) и далее к $\alpha = 10$ (красная) видно, что волновой профиль заметно меняется:

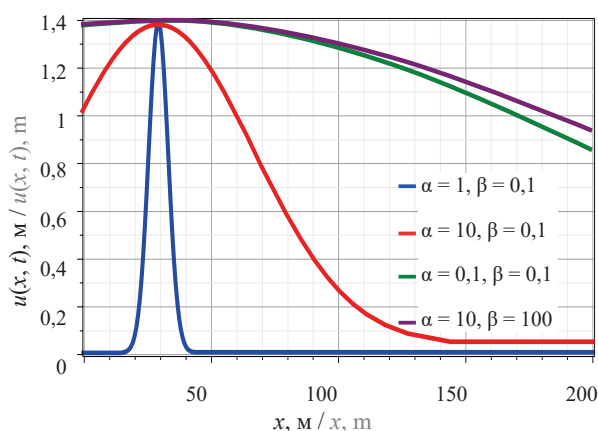


Рис. 5. Распространение сейсмической волны (при начальном гауссовом импульсе) через барьер с эффектом памяти в момент времени $t = 0,05$ с при разных параметрах ядра памяти $K(t - \tau)$. Параметры материала: $c_0 = 600$ м/с

Fig. 5. Propagation of a seismic wave (under an initial Gaussian impulse) through a barrier with a memory effect at time $t = 0.05$ s for different memory kernel parameters $K(t - \tau)$. Material parameters: $c_0 = 600$ m/s

1. Для низкого $\alpha = 0,1$ имеют место меньшие амплитуды и более пологая форма. Это означает, что эффект памяти не очень силен, и волна сохраняет более «простой» характер.

2. Для средних $\alpha = 1$ (синяя кривая) волна становится уже и имеет более выраженный пик. Более сильный эффект памяти создает более концентрированное возмущение.

3. Для высоких $\alpha = 10$ амплитуда и ширина гауссового импульса становятся еще более выраженными. Волна выглядит «раздутой» и в то же время высокой, что показывает значительное влияние прошлых состояний материала, усиливая и деформируя импульс. Таким образом, рост α усиливает отклик среды на предыдущее состояние, что либо концентрирует волновой фронт (при умеренных значениях), либо создает расширенный, но интенсивный профиль (при очень высоких значениях).

При варьировании параметра β (при равных α) наблюдается следующий характер волнового процесса:

1. При $\beta = 0,1$ (красная линия) волна высокая, вытянутая и ярко выраженная. Память среды «растянута» во времени, затухает медленно. Это дает мощный и долговременный эффект от прошлых деформаций.

2. При $\beta = 100$ (фиолетовая линия) память среды затухает гораздо быстрее. Однако благодаря очень большому α амплитуда остается высокой, но профиль становится более плавным по оси x и менее концентрированным у фронта. Быстрый распад памяти при высокой ее интенсивности ($\alpha = 10$) приводит к тому, что волна формируется как почти равномерно смещенное состояние с высокой амплитудой, но без острого пика. Иными словами, высокое β означает быстрое затухание памяти, что сглаживает быстрые

перепады, однако при большом α общая амплитуда деформаций остается на высоком уровне, хотя и в более «спокойной» форме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование демонстрирует принципиальное значение эффектов памяти материала для процессов распространения сейсмических волн через специализированные защитные барьеры. В отличие от классических волновых моделей в упругих средах без «памяти», рассмотренные интегро-дифференциальные уравнения, включающие экспоненциальные ядра памяти, дают возможность описать более сложное и тонкое поведение волнового поля. Таким образом, представленные в статье модель и соответствующий анализ позволили существенно расширить понимание механизмов взаимодействия сейсмических волн с барьерными слоями, обладающими эффектом памяти.

Полученные в работе аналитические решения и их последующий анализ обеспечивают ряд ключевых результатов.

Влияние памяти на форму фронта волны. Введение интегро-дифференциальных членов, учитывающих предысторию деформаций, приводит к заметному изменению формы волнового импульса при его распространении. Для дельта-импульса начальное «острое» возмущение, типичное для упругой среды, трансформируется в более сложную структуру с дополнительными «хвостами», отражающими накопленный опыт деформаций. Аналогично, гауссов импульс при прохождении через барьер с памятью не просто расширяется и смещается во времени и пространстве, но и приобретает искажения, связанные с взаимодействием с предыдущими состояниями системы.

Параметры ядра памяти α и β непосредственно контролируют интенсивность и длительность памяти материала. При высоких значениях α материал долго «помнит» предшествующие деформации, что приводит к существенным искажениям волнового фронта, усилению затухания или, напротив, к формированию локальных пиковых значений амплитуды. При увеличении β процесс «забывания» ускоряется, но влияние прошлых состояний на текущую волну может стать более концентрированным и резким. Таким образом, варьируя параметры ядра памяти, можно добиться целенаправленного изменения волнового поля — от формирования плавно затухающих распространений до резких, локализованных пиков и неоднородностей.

Изучение двух наиболее распространенных начальных условий — дельта-импульса и гауссова импульса — показало, что память среды по-разному влияет на их эволюцию, что говорит о чувствительности к начальному импульсу. Острые импульсные возмущения, будучи простыми в классической постановке, в среде с памятью ведут себя сложнее,

формируя системы вторичных волн и возмущений. Гладкие импульсы (гауссовы) при наличии памяти не просто «расплываются», как в упругом случае, но и могут приобретать асимметричную форму, а также формировать зоны повышенной концентрации энергии вблизи барьера.

Представленные результаты имеют непосредственное прикладное значение для задач сейсмозащиты зданий и сооружений. Возможность предсказать динамику сейсмической волны, учитывая

память материала барьера, позволяет оптимально проектировать специальные прослойки или структурные решения, снижающие воздействие сейсмических волн на сооружения. В частности, варьируя свойствами барьерных слоев — их составом, пористостью, вязкоупругими характеристиками и временем релаксации, можно создать структуры, эффективно «перераспределяющие» энергию волны, снижающие пиковые нагрузки и сейсмические воздействия на инженерные объекты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kuznetsov S.V. Seismic waves and seismic barriers // *Acoustical Physics*. 2011. Vol. 57. Issue 3. Pp. 420–426. DOI: 10.1134/S1063771011030109
2. Kuznetsov S.V. Acoustic black hole in a hyperelastic rod // *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*. 2023. Vol. 74. Issue 3. DOI: 10.1007/s00033-023-02020-x
3. Bratov V., Murachev A., Kuznetsov S.V. Utilization of a Genetic Algorithm to Identify Optimal Geometric Shapes for a Seismic Protective Barrier // *Mathematics*. 2024. Vol. 12. Issue 3. P. 492. DOI: 10.3390/math12030492
4. Shemali A.A., Javkhlan S., Kuznetsov S. Seismic protection from bulk and surface waves // *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2759. P. 030006. DOI: 10.1063/5.0103993
5. Dudchenko A.V., Dias D., Kuznetsov S.V. Vertical wave barriers for vibration reduction // *Archive of Applied Mechanics*. 2021. Vol. 91. Issue 1. Pp. 257–276. DOI: 10.1007/s00419-020-01768-2
6. Митрошин В.А. Сейсмическая защита зданий и сооружений с применением метаматериалов: текущее состояние и перспективы развития // *Архитектура, строительство, транспорт*. 2024. № 2 (108). С. 67–83. DOI: 10.31660/2782-232X-2024-2-67-83. EDN FRXXXI.
7. Григорьев Ю.М., Гаврильева А.А. Задача распространения поверхностной волны Релея в полупространстве среды Коссера в случае однородных и упруго-стесненных граничных условий // *Математические заметки СВФУ*. 2023. Т. 30. № 4. С. 81–105. DOI: 10.25587/2411-9326-2023-4-81-104. EDN CWGERM.
8. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю. Анализ сейсмических колебаний, возбуждаемых движущимся железнодорожным составом // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2021. Т. 14. № 1. С. 91–101. DOI: 10.7242/1999-6691/2021.14.1.8. EDN FYADJZ.
9. Огородников Е.Н., Радченко В.П., Унгарова Л.Г. Математические модели нелинейной вязкоупругости с операторами дробного интегро-дифференцирования // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета*. 2018. № 2. С. 147–161. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.2.13. EDN XUGGDZ.
10. Bykov D.L., Martynova E.D. Structure-energy analysis of models of nonlinearly viscoelastic materials with several aging and viscosity functions // *Mechanics of Solids*. 2011. Vol. 46. Issue 1. Pp. 52–61. DOI: 10.3103/S0025654411010080
11. Korovaytseva E.A., Pshenichnov S.G., Zhelyazov T., Datcheva M. On the Problem of Nonstationary Waves Propagation in a Linear-viscoelastic Layer // *Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences*. 2021. Vol. 74. No. 5. Pp. 748–755. DOI: 10.7546/CRABS.2021.05.13
12. Hossain M.E. Numerical investigation of memory-based diffusivity equation: the integro-differential equation // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2016. Vol. 41. Issue 7. Pp. 2715–2729. DOI: 10.1007/s13369-016-2170-y
13. Rangelov T.V., Dineva P.S., Manolis G.D. Numerical Solution of Integro-Differential Equations Modelling the Dynamic Behavior of a Nano-Cracked Viscoelastic Half-Plane // *Cybernetics and Information Technologies*. 2020. Vol. 20. Issue 6. Pp. 105–115. DOI: 10.2478/cait-2020-0065
14. Emmrich E., Weckner O. Analysis and numerical approximation of an integro-differential equation modeling non-local effects in linear elasticity // *Mathematics and Mechanics of Solids*. 2007. Vol. 12. Issue 4. Pp. 363–384. DOI: 10.1177/1081286505059748
15. Dehghan M. Solution of a partial integro-differential equation arising from viscoelasticity // *International Journal of Computer Mathematics*. 2006. Vol. 83. Issue 1. Pp. 123–129. DOI: 10.1080/00207160-500069847
16. Neta B., Igwe J.O. Finite differences versus finite elements for solving nonlinear integro-differential equations // *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. 1985. Vol. 112. Issue 2. Pp. 607–618. DOI: 10.1016/0022-247X(85)90266-5
17. Guo J., Xu D., Qiu W. A finite difference scheme for the nonlinear time-fractional partial integro-differential equation // *Mathematical Methods in the Ap-*

plied Sciences. 2020. Vol. 43. Issue 6. Pp. 3392–3412. DOI: 10.1002/mma.6128

18. Sokolovskyy Y., Levkovych M., Mokrytska O., Kaplunskyy Y. Numerical Simulation and Analysis of Systems with Memory Based on Integro-Differentiation of Fractional Order // 2018 IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT). 2018. Pp. 102–105. DOI: 10.1109/STC-CSIT.2018.8526702

19. Vlasov V.V., Rautian N.A. Well-Posed Solvability and the Representation of Solutions of Integro-Differential Equations Arising in Viscoelasticity // Differential Equations. 2019. Vol. 55. Issue 4. Pp. 561–574. DOI: 10.1134/S0012266119040141

20. Власов В.В., Раутиан Н.А. Исследование интегро-дифференциальных уравнений, возникающих в теории вязкоупругости // Известия высших учебных заведений. Математика. 2012. № 6. С. 56–60. EDN OWQBFV.

21. Vlasov V.V., Rautian N.A. Spectral analysis and representation of solutions of integro-differential equations with fractional exponential kernels // Transactions of the Moscow Mathematical Society. 2019. Vol. 80. Pp. 169–188. DOI: 10.1090/mosc/298. EDN CBRRRV.

22. Дурдыев Д.К., Болтаев А.А. Задача определения ядер в двумерной системе уравнений вязкоупругости // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Математика. 2023. Т. 43. С. 31–47. DOI: 10.26516/1997-7670.2023.43.31. EDN QENKLT.

23. Bobyleva T., Shamaev A. Problem of damping oscillations of a mechanical system with integral memory // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. Issue 2. P. 022011. DOI: 10.1088/1757-899X/869/2/022011

24. Коровайцева Е.А., Пиеничнов С.Г., Бажлева Е., Желязов Т. Нестационарные волны в линейновязкоупругом цилиндре с жестким включением // Проблемы прочности и пластичности. 2022. Т. 84. № 1. С. 5–14. DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-1-5-14. EDN XQNIFO.

25. Li Y., Yang Z. Exponential Attractor for the Viscoelastic Wave Model with Time-Dependent Memory Kernels // Journal of Dynamics and Differential Equations. 2021. DOI: 10.1007/s10884-021-10035-z. EDN ENBUOO.

26. Brunner H. Volterra integral equations. Cambridge University Press, 2017. DOI: 10.1017/9781316162491

27. Schiff J.L. The Laplace transform: theory and applications. Springer Science & Business Media, 2013. 236 p.

28. Bracewell R.N. The Fourier Transform and Its Applications. 3rd ed. Boston : McGraw-Hill, 2000. 640 p.

29. Cohen A.M. Inversion formulae and practical results // Numerical Methods and Algorithms. 2007. Vol. 5. Pp. 23–44. DOI: 10.1007/978-0-387-68855-8_2

30. Folland G.B. Fourier Analysis and Its Applications. American Mathematical Soc., 2009. 433 p.

31. Cole K.D., Beck J.V., Haji-Sheikh A., Litkouhi B. Methods for Obtaining Green's Functions // Heat Conduction Using Greens Functions. 2011. Pp. 101–148. DOI: 10.1201/9781439895214-9

Поступила в редакцию 23 января 2025 г.

Принята в доработанном виде 27 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 29 апреля 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **Сергей Гургенович Саиян** — научный сотрудник Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова (НОЦ КМ им. А.Б. Золотова), преподаватель кафедры информатики и прикладной математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 987238, Scopus: 57195230884, ORCID: 0000-0003-0694-4865, ResearcherID: AAT-1424-2021; Berformert@gmail.com.

REFERENCES

1. Kuznetsov S.V. Seismic waves and seismic barriers. *Acoustical Physics*. 2011; 57(3):420–426. DOI: 10.1134/S1063771011030109

2. Kuznetsov S.V. Acoustic black hole in a hyperelastic rod. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*. 2023; 74(3). DOI: 10.1007/s00033-023-02020-x

3. Bratov V., Murachev A., Kuznetsov S.V. Utilization of a Genetic Algorithm to Identify Optimal Geo-

metric Shapes for a Seismic Protective Barrier. *Mathematics*. 2024; 12(3):492. DOI: 10.3390/math12030492

4. Shemali A.A., Javkhlan S., Kuznetsov S. Seismic protection from bulk and surface waves. *AIP Conference Proceedings*. 2023; 2759:030006. DOI: 10.1063/5.0103993

5. Dudchenko A.V., Dias D., Kuznetsov S.V. Vertical wave barriers for vibration reduction. *Archive of Ap-*

plied Mechanics. 2021; 91(1):257-276. DOI: 10.1007/s00419-020-01768-2

6. Mitroshin V.A. Seismic protection of buildings and structures using metamaterials: current status and development prospects. *Architecture, Construction, Transport*. 2024; 2(108):67-83. DOI: 10.31660/2782-232X-2024-2-67-83. EDN FRXXXI. (rus.).

7. Grigor'ev Yu.M., Gavrilieva A.A. Propagation problem of a Rayleigh surface wave in the half-space of a Cosserat medium in the case of homogeneous and elastically constrained boundary condition. *Mathematical notes of NEFU*. 2023; 30(4):81-105. DOI: 10.25587/2411-9326-2023-4-81-104. EDN CWGERM. (rus.).

8. Zaslavsky Yu.M., Zaslavsky V.Yu. Analysis of seismic vibrations excited by a moving railway construction. *Computational Continuum Mechanics*. 2021; 14(1):91-101. DOI: 10.7242/1999-6691/2021.14.1.8. EDN FYADJZ. (rus.).

9. Ogorodnikov E.N., Radchenko V.P., Ungarova L.G. Mathematical models of nonlinear viscoelasticity with operators of fractional integro-differentiation. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2018; 2:147-161. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.2.13. EDN XUGGDZ.(rus.).

10. Bykov D.L., Martynova E.D. Structure-energy analysis of models of nonlinearly viscoelastic materials with several aging and viscosity functions. *Mechanics of Solids*. 2011; 46(1):52-61. DOI: 10.3103/S0025654411010080

11. Korovaytseva E.A., Pshenichnov S.G., Zhelyazov T., Datcheva M. On the Problem of Nonstationary Waves Propagation in a Linear-viscoelastic Layer. *Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences*. 2021; 74:5:748-755. DOI: 10.7546/CRABS.2021.05.13

12. Hossain M.E. Numerical investigation of memory-based diffusivity equation: the integro-differential equation. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2016; 41(7):2715-2729. DOI: 10.1007/s13369-016-2170-y

13. Rangelov T.V., Dineva P.S., Manolis G.D. Numerical Solution of Integro-Differential Equations Modelling the Dynamic Behavior of a Nano-Cracked Viscoelastic Half-Plane. *Cybernetics and Information Technologies*. 2020; 20(6):105-115. DOI: 10.2478/cait-2020-0065

14. Emmrich E., Weckner O. Analysis and numerical approximation of an integro-differential equation modeling non-local effects in linear elasticity. *Mathematics and Mechanics of Solids*. 2007; 12(4):363-384. DOI: 10.1177/1081286505059748

15. Dehghan M. Solution of a partial integro-differential equation arising from viscoelasticity. *International Journal of Computer Mathematics*. 2006; 83(1):123-129. DOI: 10.1080/00207160500069847

16. Neta B., Igwe J.O. Finite differences versus finite elements for solving nonlinear integro-differential equations. *Journal of Mathematical Analysis and Ap-*

plications. 1985; 112(2):607-618. DOI: 10.1016/0022-247X(85)90266-5

17. Guo J., Xu D., Qiu W. A finite difference scheme for the nonlinear time-fractional partial integro-differential equation. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*. 2020; 43(6):3392-3412. DOI: 10.1002/mma.6128

18. Sokolovskyy Y., Levkovich M., Mokrytska O., Kaplunskyy Y. Numerical Simulation and Analysis of Systems with Memory Based on Integro-Differentiation of Fractional Order. *2018 IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. 2018; 102-105. DOI: 10.1109/STC-CSIT.2018.8526702

19. Vlasov V.V., Rautian N.A. Well-Posed Solvability and the Representation of Solutions of Integro-Differential Equations Arising in Viscoelasticity. *Differential Equations*. 2019; 55(4):561-574. DOI: 10.1134/S0012266119040141

20. Vlasov V.V., Rautian N.A. Integrodifferential equations in viscoelasticity theory. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Matematika*. 2012; 6:56-60. EDN OWQBVF. (rus.).

21. Vlasov V.V., Rautian N.A. Spectral analysis and representation of solutions of integro-differential equations with fractional exponential kernels. *Transactions of the Moscow Mathematical Society*. 2019; 80:169-188. DOI: 10.1090/mosc/298. EDN CBRRRV.

22. Durdiev D.K., Boltaev A.A. The problem of determining kernels in a two-dimensional system of viscoelasticity equations. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Mathematics*. 2023; 43:31-47. DOI: 10.26516/1997-7670.2023.43.31. EDN QENKLT. (rus.).

23. Bobyleva T., Shamaev A. Problem of damping oscillations of a mechanical system with integral memory. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020; 869(2):022011. DOI: 10.1088/1757-899X/869/2/022011

24. Korovaytseva E.A., Pshenichnov S.G., Bazhlekova E., Zhelyazov T. Non-stationary waves in a linear-viscoelastic cylinder with rigid inclusion. *Problems of Strength and Plasticity*. 2022; 84(1):5-14. DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-1-5-14. EDN XQNIFO. (rus.).

25. Li Y., Yang Z. Exponential Attractor for the Viscoelastic Wave Model with Time-Dependent Memory Kernels. *Journal of Dynamics and Differential Equations*. 2021. DOI: 10.1007/s10884-021-10035-z. EDN ENBUOO.

26. Brunner H. *Volterra integral equations*. Cambridge University Press, 2017. DOI: 10.1017/9781316162491

27. Schiff J.L. *The Laplace transform: theory and applications*. Springer Science & Business Media, 2013; 236.

28. Bracewell R.N. *The Fourier Transform and Its Applications*. 3rd ed. Boston, McGraw-Hill, 2000; 640.

29. Cohen A.M. Inversion formulae and practical results. *Numerical Methods and Algorithms*. 2007; 5:23-44. DOI: 10.1007/978-0-387-68855-8_2

30. Folland G.B. *Fourier Analysis and Its Applications*. American Mathematical Soc., 2009; 433.

31. Cole K.D., Beck J.V., Haji-Sheikh A., Litkouhi B. Methods for Obtaining Green's Functions. *Heat Conduction Using Greens Functions*. 2011; 101-148. DOI: 10.1201/9781439895214-9

Received January 23, 2025.

Adopted in revised form on April 27, 2025.

Approved for publication on April 29, 2025.

B I O N O T E S: **Sergey G. Saiyan** — researcher at the Scientific and Educational Center for Computer Modeling of Unique Buildings, Structures and Complexes named after A.B. Zolotova, lecturer at the Department of Computer Science and Applied Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 987238, Scopus: 57195230884, ORCID: 0000-0003-0694-4865, ResearcherID: AAT-1424-2021; Berformert@gmail.com.

Влияние начального прогиба профилированного настила
на прочность сталежелезобетонной плиты перекрытия
в стадии эксплуатации

Юлия Александровна Шапошникова, Евгений Александрович Калинин
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Сталежелезобетонные конструкции в настоящее время являются быстроразвивающимся и перспективным направлением монолитного железобетонного строительства. Возрастающие объемы применения комбинированных конструкций и некоторые особенности их сопротивления в стадиях изготовления и эксплуатации вызывают закономерный интерес у исследователей к установлению реального напряженно-деформированного состояния на всех этапах жизненного цикла конструкции. Цель исследования — изучение влияния начального прогиба профилированного настила в стадии бетонирования на прочность сталежелезобетонных плит при эксплуатации. Объект исследования — однопролетные ортотропные сталежелезобетонные плиты перекрытий, выполненные по несъемной опалубке в виде профилированного настила марок Н75, Н144, Н153 по ГОСТ 24045–2016 и TRP200 по ГОСТ Р 52246, толщиной 0,7–0,9 мм. Предмет исследования — прочность сталежелезобетонной плиты с учетом доэксплуатационного состояния конструкции.

Материалы и методы. Применялся расчетно-аналитический метод исследования на основе действующих в РФ нормативных документов.

Результаты. Установлены значения дополнительных изгибающих моментов и поперечных сил в сталежелезобетонных плитах в стадии эксплуатации, вызванные первичным прогибом профнастила, в стадии бетонирования. Выявлены зависимости действующих усилий от размеров пролета и величины полезной нагрузки для различных марок профлиста. Анализ результатов исследования реализован в графической и табличной формах. Полученные данные для наиболее распространенных марок профлиста и пролетов плит при различных уровнях нагрузки свидетельствуют о необходимости увеличения рабочего армирования плит по отношению к первоначальному армированию.

Выводы. Сделан вывод о необходимости проведения уточняющих прочностных расчетов с учетом геометрической нелинейности конструкции в стадии эксплуатации вследствие перегруза профнастила бетонной смесью при бетонировании из-за развития начальных прогибов. При пролетах плиты 3,5 м и более и полезных нагрузках свыше 3 кПа прогиб на стадии бетонирования от действия повышенного веса бетонной смеси приводит к необходимости установки дополнительного продольного армирования в ребрах плиты. Полученные сведения могут использоваться при проектировании сталежелезобетонных плит перекрытий и оценке технического состояния сталежелезобетонных плит.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: комбинированная конструкция, несъемная опалубка, параболическая нагрузка, прогиб, профилированный настил, профлист, профнастил, прочность, сталежелезобетонная плита

Благодарности. Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за целесообразные замечания.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шапошникова Ю.А., Калинин Е.А. Влияние начального прогиба профилированного настила на прочность сталежелезобетонной плиты перекрытия в стадии эксплуатации // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 10. С. 1508–1521. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1508-1521

Автор, ответственный за переписку: Юлия Александровна Шапошникова, yuliatalyzova@yandex.ru.

Influence of initial deflection of profiled deck on the strength
of steel-reinforced concrete floor slab during operation

Yuliya A. Shaposhnikova, Evgeny A. Kalinin
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Currently, composite structures are a rapidly developing and promising area of monolithic reinforced concrete construction. The increasing use of combined structures and some features of their resistance at the stages of manufacture and operation arouse the natural interest of researchers in establishing the real stress-strain state at all stages of the life cycle of the structure. The aim of the work was to study the effect of the initial deflection of the profiled sheeting at the concreting stage on the strength of composite slabs at the operation stage. The object of the study was single-span orthotropic composite floor slabs made on permanent formwork in the form of profiled sheeting grades H75, H144, H153

according to GOST 24045–2016 and TRP200 according to GOST R 52246, 0.7–0.9 mm thick. The subject of the study was the strength of the composite slab, taking into account the pre-operational state of the structure.

Materials and methods. The study used a calculation and analytical research method based on regulatory documents in force in the Russian Federation.

Results. The values of additional bending moments and shear forces in composite slabs at the operational stage caused by the primary deflection of the corrugated sheet at the concreting stage were determined. The dependences of the acting forces on the span dimensions and the useful load value for various grades of corrugated sheets were revealed. The analysis of the research results was implemented in graphical and tabular forms. The data obtained for the most common grades of corrugated sheets and slab spans at various load levels indicate the need to increase the working reinforcement of the slabs in relation to the initial reinforcement.

Conclusions. Based on the results of the study, a conclusion was made on the need to carry out clarifying strength calculations, taking into account the geometric nonlinearity of the structure, at the operational stage due to the overload of the corrugated sheet with concrete mix during concreting due to the development of initial deflections. With slab spans greater than 3.5 m and useful loads over 3 kPa, the deflection at the concreting stage due to the action of the increased weight of the concrete mix leads to the need to install additional longitudinal reinforcement in the ribs of the slab. The obtained data can be used in the design of composite concrete floor slabs and in assessing the technical condition of composite concrete slabs.

KEYWORDS: combined structure, deflection, corrugated sheet, parabolic load, permanent formwork, profiled sheeting, reinforced concrete slab, steel-reinforced concrete structures, strength

Acknowledgements. The authors would like to thank the anonymous reviewers for their helpful comments.

FOR CITATION: Shaposhnikova Yu.A., Kalinin E.A. Influence of initial deflection of profiled deck on the strength of steel-reinforced concrete floor slab during operation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(10):1508-1521. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1508-1521 (rus.).

Corresponding author: Yuliya A. Shaposhnikova, yuliatalyzova@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из перспективных быстроразвивающихся областей проектирования являются сталежелезобетонные конструкции, которые прочно заняли особую нишу в сфере монолитного железобетонного строительства. В РФ и за рубежом применяются сталежелезобетонные плиты перекрытий в составе комбинированных конструкций для строительства теплых и холодных зданий паркингов, торговых и офисных центров и других гражданских зданий [1–3].

Широкое использование сталежелезобетона обусловлено характерными особенностями, которые выделяют его среди других видов монолитных конструкций. Так, применение стального профилированного листа в качестве внешнего армирования повышает изгибную жесткость и прочность конструкции в целом, а функция листа как несъемной опалубки защищает бетон от агрессивных внешних воздействий среды, тем самым увеличивая ее долговечность. Описанные аспекты также способствуют уменьшению материалоемкости и удешевлению производства работ [4–6].

Многие российские и зарубежные ученые изучали различные вопросы работы сталежелезобетонных перекрытий, опирающихся на металлические балки. Ф.С. Замалиев, А.Г. Тамразян, С.Н. Арутюнян исследовали напряженно-деформированное состояние (НДС) комбинированного перекрытия с учетом доэксплуатационного состояния его элементов [7, 8]. В трудах А.И. Бедова, Ю.А. Шапошниковой представлен анализ влияния разных факторов, таких как вид профнастила, пролет и толщина плиты и других, а также дефектов устройства плиты на стадии бетонирования, на прогибы и прочность сталежелезобетонного перекрытия [9–11].

Особенности расчета комбинированных перекрытий приведены в публикациях Д.А. Ургалкиной, А.М. Зульпуева и др. [12–14]. А. Альбаррам и соавт. изучали влияние геометрии ребер и типа профлиста на характеристики композитных балок и особенности их работы [15]. Э. Чапаранганда, Д.Н. Лазовский создавали методику проектирования монолитных плит перекрытия с наружным профилированным армированием из стальных листов на основе использования диаграмм материалов «напряжение – деформация» [16]. Г. Васдравеллиса и соавт. представили экспериментальное и численное исследования предельной прочности сталебетонных композитных балок, подверженных комбинированному воздействию изгиба и осевого сжатия [17].

В.О. Алмазов, С.Н. Арутюнян сравнили проектирования сталежелезобетонных плит перекрытий по Еврокоду 4 и по российским нормам [18]. Особенности проектирования комбинированных перекрытий в целом, а также отдельных его составляющих, согласно Еврокоду, рассматривали И.М. Ахмед, М. Конрад, Д. Дуймовица и др. [19–21].

Тему численного моделирования различных комбинированных конструкций изучали Ф. Альшарари, Дж.Л.П. Тамайю, Д.С. Трофимов и соавт. [22–24]. Авторы З.С. Багаев, Б.М. Борукаев разрабатывали методику моделирования сталежелезобетонного перекрытия с профилированным настилом в ПК Лира САПР [25]. С.В. Гайдук, Л.Р. Гимранов, Л.Х. Реджинато и соавт. анализировали численные модели сталежелезобетонного перекрытия, а также влияние различных факторов на результат численного эксперимента [26–28]. В.И. Адаменко и соавт. изучали особенности НДС узлов сталежелезобетонных каркасно-монолитных зданий с использованием технологии информационного моделирования зданий [29].

Помимо явных преимуществ, комбинированные конструкции обладают и некоторыми недостатками [1, 3, 6]. Так как профнастил одновременно выполняет несколько функций: служит опалубкой при бетонировании, а в стадии эксплуатации является несущей арматурой, то один из важнейших факторов — обеспечение надежной совместной работы профлиста и бетона перекрытия. Многие труды российских и зарубежных ученых посвящены именно этому вопросу. Например, Г.П. Тонких и Д.А. Чесноков занимались расчетом и оценкой прочности и деформативности уголкового анкерного упора в монолитных сталежелезобетонных перекрытиях [29, 30]. Публикация В.В. Кочерженко и соавт. посвящена разработке и планированию эксперимента для испытания выштамповки профлиста на сдвиг [31, 32]. С. Соугата, Р. Хэллмарк, Ф. Бурсас изучали функционирование различных анкерных соединителей, работающих на срез и сдвиг [33–35]. М. Типка, Т. Мацечек и соавт. исследовали влияние положения вертикальных несущих элементов для армирования сталежелезобетонных конструкций перекрытий [36, 37]. Совместную работу различных составляющих перекрытия анализировали также А.Ш.Х. Суваид, П. Колладжани, С.В. Патхирана и др. [38–40].

В ряде исследований рассматриваются различные специфические особенности работы комбинированных перекрытий. А.И. Давиденко, Ж.Л.П. Тамайо изучали прочности нормальных сечений сталебетонных плит с внешним армированием профнастилом и стержневой предварительно напрягаемой арматурой [23, 41]. А.И. Давиденко, А.А. Артеменко дали оценку огнестойкости по критерию потери несущей способности сталежелезобетонных плит перекрытия [42]. А.А. Бубис и соавт. рассматривали особенности применения комбинированных сталежелезобетонных перекрытий в сейсмоопасных районах [43].

В связи с нарастающими объемами строительства с применением сталежелезобетона неизбежно выявляются некоторые особенности изготовления и эксплуатации плит, которые также могут существенно влиять на прочность и долговечность конструкции [5, 9].

Одной из таких особенностей является появление прогибов профилированного настила в стадии бетонирования, которое приводит к росту массы бетона в изделии [9–11].

С другой стороны, увеличение постоянной нагрузки от веса бетона уменьшает возможность восприятия комплексной плитой полезной нагрузки.

Одновременно увеличение бетонного сечения в пролетной зоне плиты вследствие прогиба профлиста создает предпосылки для повышения прочности нормальных сечений.

Прогиб профлиста невозможно устранить после схватывания бетонной смеси, а значит, если

он проявился, т.е.о влияние следует учитывать в работе сталежелезобетонной плиты в стадии эксплуатации. Этим проблемам и посвящено настоящее исследование.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — сталежелезобетонная плита перекрытия, которая уложена по несъемной опалубке из профилированного настила с наименьшей изготавливаемой толщиной профлиста. Применялись профнастилы со сжатыми широкими полками марок Н75 толщиной $t = 0,7$ мм с общей толщиной плиты $h = 150$ мм; Н144, $t = 0,8$ мм, $h = 200$ мм; Н153, $t = 0,8$ мм, $h = 250$ мм по ГОСТ 24045–2016; TRP200 по ГОСТ Р 52246, $t = 0,9$ мм $h = 300$ мм. Предел текучести стали профлиста принят $R_y = 250$ Н/мм². Плита по профнастилу однопролетная, пролеты варьировались от 3 до 6 м с шагом 0,5 м. Бетон плиты тяжелый, класса В20. Армирование плиты ненапрягаемой арматурой: по всей площади плиты в верхней зоне уложена сетка Ø10 А500С с шагом 200 мм в обоих направлениях с $a_3 = 30$ мм; в каждом ребре арматура класса А500С (по расчету прочности), $a_3 = 30$ мм. Нагрузка от конструкции полов принята 1 кПа, полезная нагрузка варьировалась от 1,5 до 5 кПа с шагом 0,5 кПа.

Геометрические размеры сталежелезобетонной плиты перекрытия показаны на рис. 1.

Нормативная равномерно распределенная нагрузка на плиту q_k от собственного веса конструкций в стадии эксплуатации состоит из: нагрузки от веса профилированного настила q_w и нагрузки от собственного веса бетона q_b в соответствии с формулой:

$$q_k = q_w + q_b. \quad (1)$$

Начальный прогиб профилированного настила на стадии бетонирования может проявляться ввиду различных факторов: перелив бетона, отсутствие промежуточных опор, недостатки проектирования и другое [9–11]. Например, при отсутствии временных инвентарных опор тонкий профнастил ($t \leq 1$ мм) в стадии бетонирования может значительно прогибаться от веса свежесуложенной бетонной смеси. На рис. 2 представлена схема однопролетной стале-

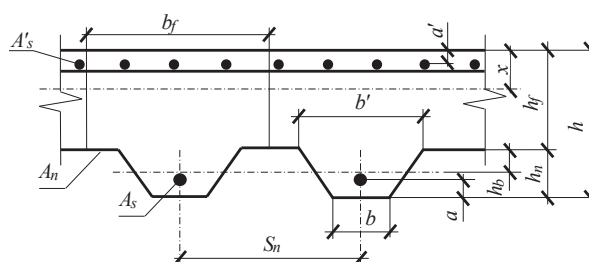


Рис. 1. Геометрические размеры сечения сталежелезобетонной плиты перекрытия

Fig. 1. Geometric dimensions of the section of the steel-reinforced concrete floor slab

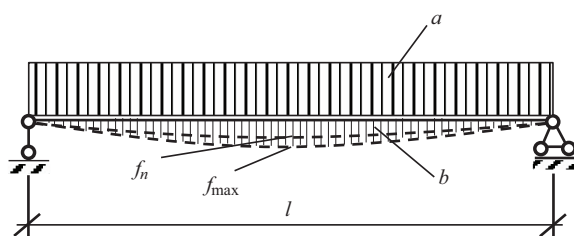


Рис. 2. Нагрузка на плиту от собственного веса бетона в стадии эксплуатации с учетом перевеса: *a* — равномерно распределенная часть нагрузки; *b* — параболическая часть нагрузки; f_n — максимальный прогиб от равномерно распределенной части нагрузки; $f_{\max}$ — максимальный прогиб от полной нагрузки (равномерно распределенная и параболическая части нагрузки); l — расчетный пролет плиты

Fig. 2. Load on the slab from the dead weight of concrete during operation, taking into account the overweight: *a* — uniformly distributed part of the load; *b* — parabolic part of the load; f_n — maximum deflection from uniformly distributed part of the load; $f_{\max}$ — maximum deflection from full load (uniformly distributed and parabolic parts of the load); l — calculated span

железобетонной плиты с нагрузкой от собственного веса бетона в стадии эксплуатации с учетом перевеса бетонной смесью ввиду развития прогиба профнастила на стадии бетонирования плиты. Таким образом, на профнастил будет действовать равномерно распределенная нагрузка q_{b1} (рис. 2, *a*) и параболическая нагрузка q_{b2} (рис. 2, *b*).

Согласно справочнику¹, параболическая нагрузка q_{b2} имеет вид, показанный на рис. 2, и вычисляется в любой точке по длине балки в соответствии с формулой:

$$q_{b2} = 4q_{p,n} \cdot x(l-x)/l^2, \quad (2)$$

где $q_{p,n}$ — максимальная нормативная параболическая нагрузка от веса бетона; x — ордината точки по длине балки, для которой ищется нагрузка; l — расчетный пролет настила.

В середине пролета профлиста на расстоянии $x = l/2$ от опоры будет действовать максимальная нормативная параболическая нагрузка от веса бетона q_p , которая определяется по выражению (3) в зависимости от плотности бетона ρ и максимального прогиба от параболической нагрузки f_p :

$$q_p = f_p \cdot \rho. \quad (3)$$

Полный первичный прогиб профнастила на стадии бетонирования $f_{\max}$ складывается из прогиба от параболической части нагрузки $f_{n,p}$ и равномерно распределенной части нагрузки от веса бетонной смеси и профлиста f_n по формуле:

$$f_{\max} = f_n + f_{n,p}. \quad (4)$$

Прогиб от нормативных нагрузок f_n , который не должен превышать $1/150$ от пролета l для перекрытий, скрытых от обзора, вычисляется по известной формуле (5) в соответствии с нормами РФ:

$$f_n = k_2(q_n \cdot l^4)/(E_{st} \cdot I_{n,x}), \quad (5)$$

где k_2 — коэффициент, определяемый в зависимости от схемы раскладки настила, для однопролетного настила — 0,013; q_n — нормативная равномерно распределенная нагрузка на профнастил; $I_{n,x}$ — момент инерции сечения профнастила на 1 м ширины профнастила.

Прогиб от параболической нагрузки $f_{n,p}$, согласно работе¹, вычисляется по формуле:

$$f_{n,p} = (61 \cdot q_p \cdot l^4)/(5760 \cdot E_{st} \cdot I_{n,x}), \quad (6)$$

где $E_{st} \cdot I_{n,x}$ — жесткость профилированного настила.

Для дальнейших расчетов прочности плиты в период эксплуатации полный первичный прогиб профнастила на стадии бетонирования $f_{\max}$ принимался с учетом параболической части нагрузки от бетонной смеси, но не больше предельного, равного $1/150$ от пролета плиты l . Это обусловлено тем, что при превышении предельного нормативного прогиба $l/150$ профнастил по результатам расчетов не проходит по прочности в стадии бетонирования плиты.

Следует отметить, что при первичном проявлении прогиба профлиста на этапе бетонирования наблюдается первичное проявление параболической нагрузки. Первичная параболическая нагрузка в свою очередь вызывает еще больший, вторичный, прогиб профнастила. Увеличенный вторичный прогиб способствует еще большей (третичной) параболической нагрузке. Этот процесс, являющийся проявлением геометрически нелинейной работы профилированного настила, происходит, пока не установится равновесное состояние конструкции. В представленной работе нелинейность работы профнастила учтена при расчете прогибов на стадии бетонирования плиты по деформируемой схеме при помощи необходимого числа итераций.

Полная нормативная нагрузка на плиту в стадии эксплуатации (с учетом перелива бетона на этапе бетонирования) в максимальной точке (в середине пролета) будет определяться в соответствии с формулой (7), а нормативная нагрузка на плиту без учета перелива бетона по выражению (8):

$$q_{\text{полн}} = q_w + q_{b1} + q_p + q_u + q_f; \quad (7)$$

$$q = q_w + q_{b1} + q_u + q_f \quad (8)$$

где q_u — нормативная полезная нагрузка на плиту в стадии эксплуатации; q_f — нормативная нагрузка от конструкции (покрытия) пола.

Максимальный изгибающий момент $M_{p,\max}$ от параболической нагрузки для однопролетной балки вычисляется в соответствии с формулой (9) согласно справочнику¹, а изгибающий момент M_d

¹ Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический. В 2 кн. Кн. I. Изд. 2-е, перераб. и доп. / под ред. А.А. Уманского. М. : Стройиздат, 1972. 609 с.

от равномерно распределенной части нагрузки по известной формуле (10):

$$M_{p,\max} = 5q_p \cdot l^2/48; \quad (9)$$

$$M_d = q_l^2/8, \quad (10)$$

где q_p — максимальная расчетная параболическая нагрузка; l — расчетный пролет настила; q — расчетная равномерно распределенная нагрузка.

Таким образом, полный изгибающий момент от всех расчетных нагрузок можно определить в соответствии с выражением:

$$M = M_d + M_{p,\max} = q_l^2/8 + 5/48 \cdot q_p \cdot l^4. \quad (11)$$

Необходимо обратить внимание, что ввиду возрастания нагрузки на плиту от собственного веса бетона внешний момент будет расти. С другой стороны, из-за неизбежного наращивания бетонного сечения в пролетной зоне сталежелезобетонной плиты внутренний момент сечения будет также увеличиваться вследствие завышенной рабочей высоты сечения h_0 . Однако стоит отметить, что рабочая высота сечения может считаться завышенной лишь в том случае, когда нижняя продольная рабочая арматура, устанавливаемая в ребрах профлиста, не сохраняет свое проектное положение, а изгибается вместе с профлистом, работающим в качестве несъемной опалубки. Для объекта исследования продольная арматура в ребрах профлиста принята стержневая класса А500С по расчету прочности, диаметрами от Ø10 до Ø18. Применение диаметров арматуры свыше 10 мм практически исключает возможность ее изгиба за счет достаточной жесткости стержней, поэтому в представленной работе возможность завышения рабочей высоты сечения в расчетах не учитывалась.

Согласно СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования», в стадии эксплуатации сталежелезобетонная плита рассчитывается как железобетонная конструкция с внешней рабочей арматурой из стального профилированного настила и с гибкой стержневой арматурой. Неразрезная железобетонная плита, армированная профилированным настилом, при отсутствии расчетной гибкой арматуры над опорами, рассчитывается как однопролетная конструкция. При установке над опорами плиты расчетной стержневой арматуры усилия в плите определяются как в неразрезной железобетонной конструкции, допускающей перераспределение моментов в соответствии с требованиями трещиностойкости. В данном исследовании будет рассматриваться однопролетная сталежелезобетонная плита.

Высота сжатой зоны бетона x должна удовлетворять условию $x \leq \xi_R \cdot h_0$, где $\xi_R = 0,493$ — относительная высота сжатой зоны сечения при использовании продольной арматуры класса А500С; h_0 — рабочая высота сечения. Если условие не со-

блюдается, то следует увеличить толщину плиты, повысить класс бетона по прочности на сжатие, расположить в сжатой зоне дополнительную стержневую арматуру с тем, чтобы высота сжатой зоны не превышала граничную.

В соответствии с СП 266.1325800.2016 в зависимости от положения нейтральной оси в сечении сталежелезобетонной плиты в пролете возможны три случая расчета на прочность нормальных сечений:

- нейтральная ось находится в пределах толщины полки плиты и не пересекает стенок профилированного настила;
- нейтральная ось пересекает стенки профилированного настила;
- нейтральная ось находится на уровне верхней полки профилированного настила. В настоящей работе для выбранного объекта расчета (параметры сталежелезобетонной плиты см. выше) для прочностных расчетов применялся случай 1.

В случае 1 высоту сжатой зоны сечения плиты определяют из условия (12). А при расчете прочности плиты в случае 1 проверяется условие (13):

$$R_b \cdot b_f \cdot x = \gamma_c \cdot R_y \cdot A_n + R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_s; \quad (12)$$

$$M \leq R_b \cdot b_f \cdot x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} \cdot A'_s \cdot (h_0 - a'), \quad (13)$$

где R_b — расчетное сопротивление бетона сжатию; b_f — ширина верхней части расчетного сечения; x — высота сжатой зоны бетона; γ_c — коэффициент условия работы; R_y — расчетное сопротивление растяжению стального настила; A_n — площадь поперечного сечения одного гофра настила; R_s — расчетное сопротивление растяжению стержневой растянутой арматуры; A_s — площадь поперечного сечения стержневой растянутой арматуры; R_{sc} — расчетное сопротивление сжатию стержневой сжатой арматуры; A'_s — площадь поперечного сечения стержневой сжатой арматуры; M — изгибающий момент в рассматриваемом сечении плиты от полных нагрузок; h_0 — высота рабочего сечения плиты; a' — защитный слой сжатой стержневой арматуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 1 представлены результаты расчета превышения изгибающих моментов (за счет проявления первичного прогиба профнастила) в сталежелезобетонных плитах перекрытий в стадии эксплуатации в зависимости от пролета и величины полезной нагрузки (1,5–5,0 кПа) для марок профлиста Н75, Н144, Н153 по ГОСТ 24045–2016 и TRP200 по ГОСТ Р 52246 и при наиболее характерной толщине плиты для каждой марки профлиста ($h = 300, 250, 200, 150$ мм).

В табл. 2 приведены результаты расчета, подобранного по сортаменту армирования сталежелезобетонных плит в зависимости от пролета и полезной нагрузки для различных марок профлиста

Табл. 1. Превышение по моментам $M/M_{p,max}$, %, в зависимости от пролета и полезной нагрузки
Table 1. Excess in moments $M/M_{p,max}$, %, depending on span and payload

Марка профнастила, толщина плиты h , м Profiled sheeting grade, board thickness h , m	Полезная нагрузка q_u , кПа Payload q_u , kPa	Превышение по моментам $M/M_{p,max}$, % Moment overrun $M/M_{p,max}$, %						
		Пролет l , м / Spring l , m						
		3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
TRP200, $h = 300$ мм / mm	1,5	1,67	3,13	5,4	8,81	10,16	11,06	11,95
	2,0	1,54	2,88	4,98	8,15	9,41	10,25*	11,08
	2,5	1,42	2,67	4,62	7,59	8,76	9,55	10,33
	3,0	1,33	2,48	4,31	7,09	8,2	8,94	9,68
	3,5	1,24	2,33	4,04	6,66	7,7*	8,41*	9,1
	4,0	1,17	2,19	3,8	6,27	7,26	7,93	8,59
	5,0	1,04	1,95	3,4	5,63	6,52	7,12	7,72*
H153, $h = 250$ мм / mm	1,5	1,77	3,3	5,7	8,85	9,74	10,61*	11,47*
	2,0	1,63	3,05	5,28	8,22	9,05	9,86	10,7
	2,5	1,51	2,83	4,91	7,67	8,45*	9,22*	9,97
	3,0	1,41	2,65	4,6	7,19	7,92*	8,65*	9,36
	3,5	1,33	2,48	4,32	6,76	7,46	8,14	8,82*
	4,0	1,25	2,34	4,07	6,39*	7,05*	7,7	8,34*
	5,0	1,12	2,1	3,65	5,75*	6,34	6,93*	7,52*
H114, $h = 200$ мм / mm	1,5	2,27	4,25	7,04	9,11	10,03	10,92	11,79
	2,0	2,09	3,92	6,51	8,44*	9,29	10,13	10,95*
	2,5	1,94	3,64	6,05	7,85*	8,66*	9,45	10,22
	3,0	1,8	3,39	5,66	7,36	8,11	8,85*	9,58*
	3,5	1,69	3,18	5,31	6,91	7,62	8,32	9,01
	4,0	1,59	2,99	5*	6,52*	7,19	7,86	8,51
	5,0	1,42	2,68	4,48*	5,85	6,46*	7,06*	7,66*
H75, $h = 150$ мм / mm	1,5	6,34	8,13	7,23*	10,22	11,23*	12,21*	13,18
	2,0	5,8	7,45*	8,43*	9,38	10,32	11,23	12,13*
	2,5	5,34	6,88*	7,78*	8,67	9,54	10,4	11,24
	3,0	4,95	6,38*	7,23	8,06	8,88	9,68*	10,47*
	3,5	4,62	5,96*	6,75*	7,53*	8,3	9,05	9,8
	4,0	4,32	5,58*	6,33*	7,07*	7,79*	8,5	9,21
	5,0	3,84	4,96	5,63	6,29	6,94*	7,58*	8,22

Примечание: серым цветом отмечены ячейки с результатами превышения (в %) изгибающих моментов в сталежелезобетонных плитах, для которых из-за проявления значительных прогибов профнастила на стадии бетонирования необходимо увеличение площади рабочего армирования в ребрах плиты свыше требований стандартного расчета (от действия нормативной равномерно распределенной нагрузки без учета первоначального прогиба); * — результаты, для которых также необходимо увеличение площади рабочего армирования в ребрах плиты свыше требуемого, но за счет запаса прочности (при первичном подборе арматуры по сортаменту в большую сторону) не требуется перерасхода арматуры; жирным шрифтом отмечены результаты, для которых прогиб профнастила f_{max} в стадии бетонирования сталежелезобетонной плиты с учетом параболической части нагрузки по расчету изначально получен свыше нормативного $l/150$. Эти значения превышения моментов в итоге рассчитаны с ограничением первичного прогиба профнастила $f_{max} = l/150$, так как при превышении предельного нормативного прогиба $l/150$ профнастил не проходит по расчету прочности на стадии бетонирования сталежелезобетонной плиты.
Note: cells with the results of excess (in %) of bending moments in composite concrete slabs are marked in grey. These results require an increase in the area of working reinforcement in the slab ribs above the requirements of the standard calculation (due to the action of the standard uniformly distributed load without taking into account the initial deflection) due to the occurrence of significant deflections of the corrugated sheets at the concreting stage; * — results for which an increase in the area of working reinforcement in the slab ribs above the required amount is also necessary, but due to the safety margin (during the initial selection of reinforcement according to the assortment on the larger side), no excess of reinforcement consumption is required; results for which the deflection of the corrugated sheets f_{max} at the concreting stage of the composite concrete slab, taking into account the parabolic part of the load, according to the calculation was initially obtained in excess of the standard $l/150$ are marked in bold. These values of the excess moments are ultimately calculated with the limitation of the primary deflection of the corrugated sheet $f_{max} = l/150$, since if the maximum standard deflection $l/150$ is exceeded, the corrugated sheet does not pass the strength calculation at the stage of concreting the steel-reinforced concrete slab.

Н75, Н144, Н153 по ГОСТ 24045–2016 и TRP200 по ГОСТ Р 52246: A_s — армирование, полученное при расчете на стандартную равномерно распределенную нагрузку; $A_{s,p}$ — армирование, полученное при добавлении параболической нагрузки от первоначального прогиба.

Количество стержней рабочей арматуры на расчетную ширину профлиста 750 мм зависело от поперечного сечения плиты и марки профнастила. Для профнастила марки Н75 по ГОСТ Р 52246 устанавливались 4 стержня рабочей арматуры в ребрах, для марок Н114, Н153 по ГОСТ Р 52246 — 3 стерж-

Табл. 2. Армирование по сортаменту сталежелезобетонной плиты в зависимости от пролета и полезной нагрузки
Table 2. Reinforcement according to the range of steel-reinforced concrete slabs depending on the span and useful load

Марка профнастила, толщина плиты h , м Profiled sheeting grade, board thickness h , m	Полезная нагрузка q_u , кПа Payload q_u , kPa	Армирование в гофрах, см ² , при различных пролетах плиты l , м Reinforcement in corrugations, cm ² , for different slab spans l , m													
		3		3,5		4		4,5		5		5,5		6	
		A_s	$A_{s,p}$	A_s	$A_{s,p}$	A_s	$A_{s,p}$	A_s	$A_{s,p}$	A_s	$A_{s,p}$	A_s	$A_{s,p}$	A_s	$A_{s,p}$
TRP200, $h = 300$ мм mm	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,283	0,283	0,789
	2,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,283	0,283	0,503	0,789
	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,283	0,503	0,789	1,131
	3,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,283	0,503	0,789	1,131	1,539
	3,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,283	0,283	0,789	0,789	1,131	1,539
	4,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,283	0,503	0,789	1,131	1,539	2,011
	5,0	0	0	0	0	0	0	0,283	0,283	0,789	0,789	1,131	1,539	2,011	2,011
Н153, $h = 250$ мм mm	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,59	0,59	1,15	1,15
	2,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,59	0,59	1,15	1,15	1,51
	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,59	0,59	1,15	1,15	1,51	2,36
	3,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,59	0,59	1,15	1,15	1,51	2,36
	3,5	0	0	0	0	0	0	0	0,59	0,59	1,15	1,15	1,51	2,36	2,36
	4,0	0	0	0	0	0	0	0,59	0,59	1,15	1,15	1,51	2,36	2,36	2,36
	5,0	0	0	0	0	0	0	0,59	0,59	1,15	1,51	2,36	2,36	3,39	3,39
Н114, $h = 200$ мм mm	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0,59	0,59	1,15	1,15	1,51	1,51	2,36
	2,0	0	0	0	0	0	0	0,59	0,59	0,59	1,15	1,51	2,36	2,36	2,36
	2,5	0	0	0	0	0	0	0,59	0,59	1,15	1,15	1,51	2,36	2,36	3,39
	3,0	0	0	0	0	0	0	0,59	1,15	1,15	1,51	2,36	2,36	3,39	3,39
	3,5	0	0	0	0	0	0,86	0,59	1,15	1,51	2,36	2,36	3,39	3,39	4,62
	4,0	0	0	0	0	0,86	0,86	1,15	1,15	1,51	2,36	2,36	3,39	3,39	4,62
	5,0	0	0	0	0	0,86	0,86	1,15	1,51	2,36	2,36	3,39	3,39	4,62	4,62
Н75, $h = 150$ мм mm	1,5	0	0	0	1,13	1,13	1,13	1,54	1,54	2,01	2,01	3,14	3,14	3,14	4,52
	2,0	0	0	1,13	1,13	1,13	1,13	1,54	1,54	2,01	3,14	3,14	4,52	4,52	4,52
	2,5	0	0	1,13	1,13	1,13	1,13	1,54	2,01	3,14	3,14	3,14	4,52	4,52	6,16
	3,0	0	0	1,13	1,13	1,13	2,01	2,01	3,14	3,14	3,14	4,52	4,52	6,16	6,16
	3,5	0	0	1,13	1,13	2,01	2,01	3,14	3,14	3,14	4,52	4,52	6,16	6,16	6,16
	4,0	0	0	1,13	1,13	2,01	2,01	3,14	3,14	4,52	4,52	4,52	6,16	6,16	8,04
	5,0	0	0	1,13	2,01	2,01	3,14	3,14	4,52	4,52	4,52	6,16	6,16	8,04	10,18

Примечание: 0 означает, что по результатам расчета прочности рабочее армирование в гофрах не требуется, т.е. в данном случае достаточно работы профлиста в качестве внешнего армирования (армирование в гофрах может устанавливаться из конструктивных соображений).
Note: 0 means that according to the results of the strength calculation the working reinforcement in corrugations is not required, i.e. in this case it is enough to work corrugated sheet as external reinforcement (reinforcement in corrugations can be installed for structural reasons).

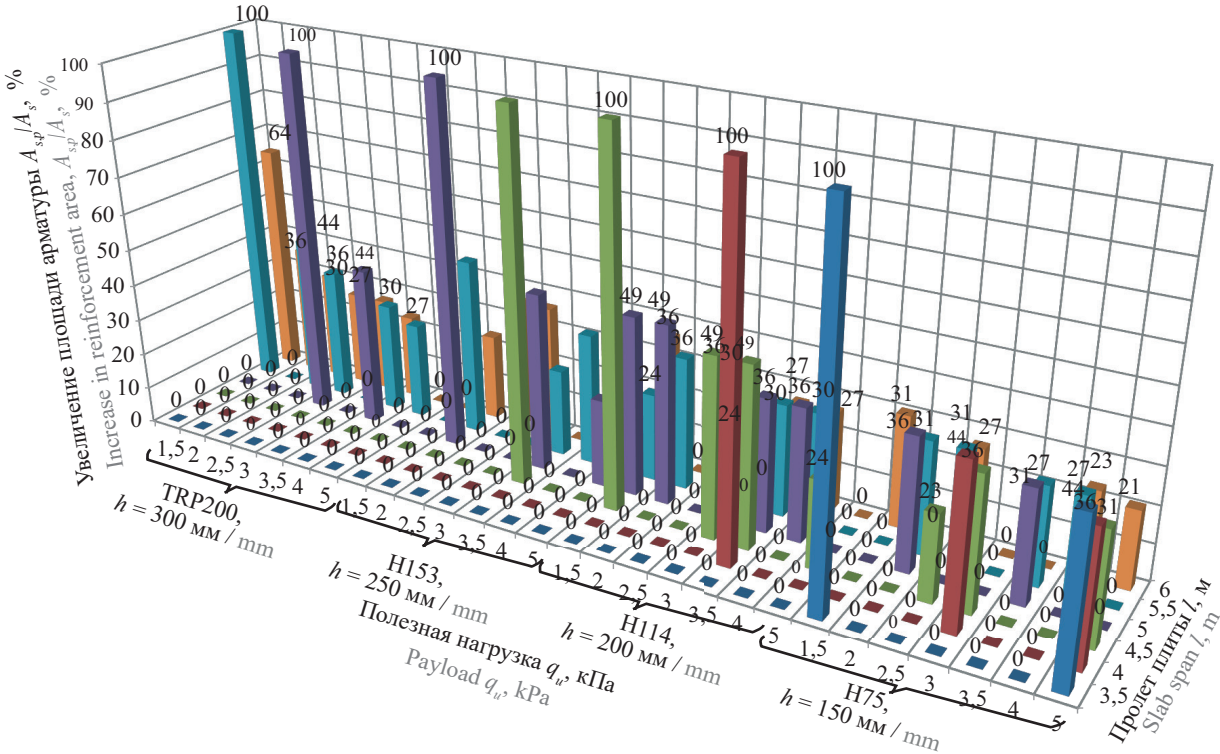


Рис. 3. Необходимость увеличения рабочего армирования в гофрах, %, по отношению к подобранному по сортаменту первоначальному армированию сталежелезобетонных плит без учета перевеса (A_{sp}/A_s)

Fig. 3. Increase in working reinforcement in corrugations, %, in relation to the initial reinforcement of steel-reinforced concrete slabs selected according to the assortment, without taking into account the excess weight (A_{sp}/A_s)

ня, а для профнастила марки TRP200 по ГОСТ Р 52246 — 1 стержень, т.е. для всех марок профнастила устанавливалось по 1 рабочему стержню в каждое ребро. При этом профнастил в расчете учитывался как внешняя рабочая арматура.

По результатам расчета из табл. 1 видно, что при наименьшей полезной нагрузке (1,50 кПа) и наибольшем пролете (6 м) добавление параболической нагрузки ведет к наибольшему превышению изгибающего момента на 12–13 %. Однако этот процент превышения момента не во всех случаях влияет на необходимость перерасхода арматуры, как видно из табл. 2.

Также из результатов расчета можно сделать вывод, что для профнастила марки H75 по ГОСТ Р 52246, толщиной $t = 0,7$ мм с общей толщиной плиты $h = 150$ мм, при пролетах $l \geq 3,5$ м профнастил не проходит по прочности в стадии бетонирования сталежелезобетонной плиты, а также развивается прогиб профнастила f_{max} свыше нормативного $l/150$.

Для профнастила марки H114 по ГОСТ Р 52246, толщиной $t = 0,8$ мм с общей толщиной плиты $h = 200$ мм и для профнастила марки H153 по ГОСТ Р 52246, $t = 0,8$ мм, $h = 250$ мм, при пролетах $l \geq 4,5$ м профнастил не проходит по прочности в стадии бетонирования сталежелезобетонной плиты и также развивается прогиб профнастила f_{max} свыше нормативного $l/150$.

Для профнастила марки TRP200 по ГОСТ Р 52246, $t = 0,9$ мм, $h = 300$ мм, при пролетах $l \geq 4$ м профнастил не проходит по прочности в стадии бетонирования сталежелезобетонной плиты, а при пролетах $l \geq 5$ м прогиб профнастила на стадии бетонирования больше предельного, установленного нормами, т.е. $f_{max} \geq l/150$.

В ходе анализа работы сталежелезобетонных плит с профилированным настилом стоит учитывать, что, помимо представленных расчетов прочности на действие изгибающего момента, сталежелезобетонные плиты необходимо рассчитывать на действие поперечной силы, проверять сцепление профнастила с бетоном и выполнять расчет ребра на опорах. Особое внимание следует уделять расчетам наиболее тонких плит ($h = 150$ мм, марки H75) и тонких профлистов ($t < 1$ мм).

При вычисленном первоначальном прогибе профнастила $f_{max} \geq l/150$ от возможного действия дополнительной параболической нагрузки выполнять расчет прочности плиты в стадии эксплуатации нецелесообразно, так как при таком прогибе профнастил не проходит по прочности в стадии бетонирования сталежелезобетонной плиты. Такие пролеты сталежелезобетонных плит не применимы при отсутствии промежуточных инвентарных опор.

На рис. 3 показаны графики необходимости увеличения рабочего армирования в гофрах, %, по отношению к подобранному по сортаменту пер-

воначальному армированию сталежелезобетонных плит без учета перевеса, т.е. A_{sp}/A_s , где A_{sp} — армирование, полученное при добавлении параболической нагрузки от первоначального прогиба; A_s — армирование, полученное при расчете на стандартную равномерно распределенную нагрузку. Результаты на рис. 3 приведены для различных марок профлиста Н75, Н144, Н153 по ГОСТ 24045–2016 и TRP200 по ГОСТ Р 52246 в зависимости от пролета и полезной нагрузки.

Из результатов расчета табл. 2 и рис. 3 видно, что необходимость перерасхода арматуры из-за перевеса плиты бетонной смесью может составлять в отдельных случаях до 100 %. Для профнастила марки Н75 (по ГОСТ Р 52246, $t = 0,7$ мм, $h = 150$ мм) необходима большая площадь растянутой арматуры при разных уровнях полезной нагрузки уже при пролетах $l \geq 3,5$ м; для Н114 (по ГОСТ Р 52246, $t = 0,8$ мм, $h = 200$ мм) — при пролетах $l \geq 4$ м; для Н153 (по ГОСТ Р 52246, $t = 0,8$ мм, $h = 250$ мм) — при пролетах $l \geq 4,5$ м; для TRP200 (по ГОСТ Р 52246, $t = 0,9$ мм, $h = 300$ мм) — при пролетах $l \geq 5$ м.

В случае выявления необходимости увеличенной площади рабочего армирования в гофрах (когда профлиста в качестве внешнего армирования недостаточно) вероятность того, что принятой по сортаменту рабочей арматуры, подобранной без учета перевеса, будет недостаточно с учетом последующего перевеса параболической нагрузкой, составляет около: 79 % — для профнастила марки TRP200 по ГОСТ Р 52246; 44 % — для марки Н153; 56 % — для марки Н114; 43 % — для марки Н75 по ГОСТ Р 52246.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам данного исследования можно сделать общие выводы и привести рекомендации.

Расчет полных прогибов профнастила в стадии бетонирования сталежелезобетонной плиты следует проводить, принимая во внимание перегруз плиты бетонной смесью, а также с обязательным учетом нелинейности работы конструкции, т.е. по деформируемой схеме.

При пролетах плиты свыше 4 м ($l \geq 4$ м) тонкие профнастилы ($t \leq 1$ мм) не проходят по прочности в стадии бетонирования. Для профнастила марок Н75, Н144, Н153 по ГОСТ 24045–2016 при пролетах свыше 4 м рекомендуется использовать в обязательном порядке дополнительные опоры с шагом

1–2 м в пролетной зоне профнастила. Для профнастила марки TRP200 по ГОСТ Р 52246 при пролетах свыше 4 м рекомендуется применять профнастил только со сжатыми узкими полками или использовать в обязательном порядке дополнительные опоры с шагом 1–2 м.

При пролетах 3,5 м и выше ($l \geq 3,5$ м), при полезных нагрузках свыше 3,0 кПа прогиб на стадии бетонирования от действия параболической нагрузки от повышенного веса бетонной смеси приводит к необходимости установки армирования в ребрах плиты площадью свыше требований стандартного расчета (от действия нормативной равномерно распределенной нагрузки, без учета первоначального прогиба) на ≈ 30 %, ≈ 50 % и более, а в отдельных случаях и на 100 %.

Если пролеты свыше 3,5 м предлагается проверить первоначальные прогибы профнастила даже при предварительной установке дополнительных опор.

С целью выявления прогиба сталежелезобетонной плиты на стадии бетонирования свыше $l/200$ следует производить обязательный проверочный расчет прочности сталежелезобетонной плиты в стадии эксплуатации с учетом дополнительного веса бетона от чрезмерного прогиба профнастила.

При бетонировании сталежелезобетонных плит необходимо подавать бетон равномерно с применением бетононасоса, особенно при использовании тонких профлистов ($t \leq 1$ мм). Подача бетонной смеси из бадьи недопустима, так как чрезмерная локальная нагрузка в пролетной зоне может привести к ненормативным прогибам профлиста на стадии бетонирования и последующему перегрузу плиты, в худшем случае — к обрушению участков профнастила, используемого в качестве несъемной опалубки.

Учет начальных прогибов профнастила позволяет точнее оценить действительную прочность сталежелезобетонной плиты для более полного применения ее несущей способности в стадии эксплуатации. Полученные данные могут использоваться при проектировании сталежелезобетонных плит перекрытий и обследовании технического состояния возведенных конструкций сталежелезобетонных плит.

Дальнейшим направлением исследования может стать изучение влияния дефектов устройства плиты по профлисту на прочность сталежелезобетонного перекрытия при взаимодействии с агрессивными средами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бабалич В.С., Андросов Е.Н. Сталежелезобетонные конструкции и перспектива их применения в строительной практике России // Успехи современной науки. 2017. Т. 4. № 4. С. 205–208. EDN YROOWX.

2. Никулина О.В., Цымдянкина Н.Ю. Анализ конструктивных решений сталежелезобетонных перекрытий // Оренбургские горизонты: прошлое, настоящее, будущее : сб. мат. Всеросс. науч.-практ. конф., посвящ. 275-летию Оренбургской губернии

и 85-летию Оренбургской области. 2019. С. 157–161. EDN WBTOMY.

3. Туснин А.Р., Мыльников И.В. Быстросборные узлы в стальных каркасах многоэтажных зданий // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 6. С. 942–959. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.942-959. EDN KXXGCG.

4. Будюшкина К.А., Кузнецов В.С., Мурлышева Ю.А., Улямаев А.С., Шапошникова Ю.А. Анализ работы комбинированных балок в широком диапазоне нагрузок // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2 (49). С. 169. EDN YATGDB.

5. Lu L., Ding Y., Guo Ya., Hao H., Ding S. Flexural performance and design method of the prefabricated RAC composite slab // Structures. 2022. Vol. 38. Pp. 572–584. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.02.022

6. Yao G., Chen Y., Yang Y., Ma X., Men W. Investigation on buckling performance of prefabricated light steel frame materials under the action of random defects during construction // Materials. 2023. Vol. 16. Issue 16. P. 5666. DOI: 10.3390/ma16165666

7. Тамразян А.Г., Арутюнян С.Н. Исследование начальных напряжений и прогибов профнастила, возникающих при возведении сталежелезобетонных плит перекрытий // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. 2017. № 1. С. 139–146. EDN ZXNSCX.

8. Замалиев Ф.С., Тамразян А.Г. К расчету сталежелезобетонных ребристых плит для восстанавливаемых перекрытий // Строительство и реконструкция. 2021. № 5 (97). С. 3–15. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-3-15. EDN BDUMYX.

9. Bedov A., Shaposhnikova Yu. Bearing capacity of steel-reinforced concrete floor elements before the operation period // Magazine of Civil Engineering. 2024. No. 1 (125). DOI: 10.34910/MCE.125.1. EDN HBTNSM.

10. Шапошникова Ю.А. Анализ влияния различных факторов на прогибы профилированного настила в стадии бетонирования плиты // Инженерный вестник Дона. 2024. № 5 (113). С. 551–568. EDN CORURC.

11. Шапошникова Ю.А. Влияние различных факторов на прогибы и прочность профилированного настила в стадии бетонирования сталежелезобетонной плиты // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 7. № 3. С. 44–53. DOI: 10.22227/2949-1622.2024.3.44-53. EDN DADHLD.

12. Ургалкина Д.А. Применение деформационной модели к расчету железобетонных перекрытий по стальному профилированному листу // Мировая наука. 2019. № 6 (27). С. 527–531. EDN KGJGTU.

13. Zulpuev A.M., Abdullaev U.D., Iranova N.A., Kochkonbaev B.A., Kenzhebaeva B.P. Calculation of strength and movement of slabs steel profiled deckings under local loads // In the World of Science and Education. 2025. Issue 1. Pp. 150–159. DOI: 10.24412/3007-8946-2025-152-150-159. EDN SPRPNZ.

14. Kuznetsov V., Shaposhnikova Yu. Features of calculation and design of complex concrete monolithic slabs // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 02027. DOI: 10.1051/mateconf/201825102027

15. Albarram A., Qureshi J., Abbas A. Effect of Rib Geometry in Steel–Concrete Composite Beams with Deep Profiled Sheeting // International Journal of Steel Structures. 2020. Vol. 20. Issue 3. Pp. 931–953. DOI: 10.1007/s13296-020-00333-5

16. Chaparanganda E., Lazowski D. Design method for cast in-situ floor slab with external profiled steel deck as reinforcement // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации 2024. 2024. С. 73–83. EDN HCQRUF.

17. Vasdravellis G., Uy B., Tan E.L., Kirkland B. Behaviour and design of composite beams subjected to sagging bending and axial compression // Journal of Constructional Steel Research. 2015. Vol. 110. Pp. 29–39. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.03.010

18. Алмазов В.О., Арутюнян С.Н. Проектирование сталежелезобетонных плит перекрытий по Еврокоду 4 и российским рекомендациям // Вестник МГСУ. 2015. № 8. С. 51–65. EDN UGUIR.

19. Ahmed I.M., Tsavdaridis K.D. The evolution of composite flooring systems: applications, testing, modelling and Eurocode design approaches // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 155. Pp. 286–300. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.01.007

20. Konrad M., Kuhlmann U. Headed studs used in trapezoidal steel sheeting according to Eurocode 4 // Structural Engineering International. 2009. Vol. 19. Issue 4. Pp. 420–426. DOI: 10.2749/10168660978984-7118

21. Dujmovic D., Androić B., Lukačević I. Hoesch Additive Floor // Composite Structures According to Eurocode 4. 2014. Pp. 797–824. DOI: 10.1002/9783433604908.ch22

22. Alsharari F., El-Zohairy A., Salim H., El-Sisi A.E. Numerical investigation of the monotonic behavior of strengthened Steel-Concrete composite girders // Engineering Structures. 2021. Vol. 246. P. 113081. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113081

23. Tamayo J.L.P., Franco M.I., Morsch I.B., Désir J.M., Wayar A.M.M. Some aspects of numerical modeling of steel-concrete composite beams with prestressed tendons // Latin American Journal of Solids and Structures. 2019. Vol. 16. Issue 7. DOI: 10.1590/1679-78255599

24. Трофимов Д.С. Исследования работы монолитного перекрытия по металлическим балкам с нарушенным сцеплением при помощи численной модели // Молодой ученый. 2022. № 21 (416). С. 73–78. EDN SSRXIL.

25. Багаев З.С., Борукаев Б.М. Методика моделирования сталежелезобетонного перекрытия с профилированным настилом в ПК Лири САПР // Стратегическое развитие инновационного потенциала отрасли

лей, комплексов и организаций : сб. ст. X Междунар. науч.-практ. конф. 2022. С. 18–21. EDN EKDSAO.

26. Гайдук С.В., Чудинов Ю.Н. Расчетные модели сталежелезобетонных перекрытий с монолитной плитой по стальному профилированному настилу // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия : мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 179–183. EDN XBYUSY.

27. Гимранов Л.Р., Фаттахова А.И. Определение характеристик модели сталежелезобетонной диафрагмы, влияющих на результат численного эксперимента // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 1. С. 18–25. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.01.18-25. EDN LEKTSZ.

28. Reginato L.H., Tamayo J.L.P., Morsch I.B. Finite element study of effective width in steel-concrete composite beams under long-term service loads // Latin American Journal of Solids and Structures. 2018. Vol. 15. Issue 8. DOI: 10.1590/1679-78254599

29. Adamenko V., Dziubko D., Romanyshen O. Stress-strain state investigation of nodes of composite steel-reinforced concrete frame-monolithic buildings using information technology for structural analysis and building information modeling // Mechanics and Mathematical Methods. 2024. Vol. 6. Issue 1. Pp. 107–123. DOI: 10.31650/2618-0650-2024-6-1-107-123

30. Тонких Г.П., Чесноков Д.А. Оценка прочности и деформативности угловых анкерных упоров в монолитных сталежелезобетонных перекрытиях // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 5. № 1. С. 27–44. DOI: 10.22227/2949-1622.2024.1.27-44. EDN BUVBSZ.

31. Тонких Г.П., Чесноков Д.А. Расчет угловых анкерных упоров в сталежелезобетонных перекрытиях по профилированному настилу // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 7. С. 17–23. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.07.17-23. EDN AVBAPK.

32. Кочерженко В.В., Сапожников П.В., Кузнецов В.В. Планирование эксперимента испытания выштамповки на сдвиг в перпендикулярном направлении // Инженерный вестник Дона. 2023. № 11 (107). С. 409–425. EDN CMSRFZ.

33. Sougata C., Umatamaheswari N. Numerical investigation of steel-concrete composite beams using flexible shear connectors // AIMS Materials Science. 2022. Vol. 9. Issue 5. Pp. 668–683. DOI: 10.3934/materials.2022041

34. Hällmark R., Collin P., Hicks S.J. Post-installed shear connectors: Push-out tests of coiled spring pins vs. headed studs // Journal of Constructional Steel

Research. 2019. Vol. 161. Pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.06.009

35. Farid B., Boutagouga D. Parametric study of I-shaped shear connectors with different orientations in push-out test // Frattura ed Integrità Strutturale. 2021. Vol. 15. Issue 57. Pp. 24–39. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.57.03

36. Tipka M., Macecek T., Vaskova J. Analysis of Position Effect of Vertical Load-Bearing Elements for Reinforcement of Steel Reinforced Concrete Floor Structures // Key Engineering Materials. 2024. Vol. 976. Pp. 11–20. DOI: 10.4028/p-jmrgs4

37. Maceček T. Analysis of Position Effect of Vertical Load-bearing Elements for Reinforcement of Steel Reinforced Concrete Floor Structures : Bachelor Thesis. CTU in Prague, 2023.

38. Suwaed A.S.H., Karavasilis T.L. Demountable steel-concrete composite beam with full-interaction and low degree of shear connection // Journal of Constructional Steel Research. 2020. Vol. 171. P. 106152. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106152

39. Colajanni P., Mendola L.L., Monaco A. Review of push-out and shear response of hybrid steel-trussed concrete beams // Buildings. 2018. Vol. 8. Issue 10. P. 134. DOI: 10.3390/buildings8100134

40. Pathirana S.W., Uy B., Mirza O., Zhu X. Bolted and welded connectors for the rehabilitation of composite beams // Journal of Constructional Steel Research. 2016. Vol. 125. Pp. 61–73. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.06.003

41. Давиденко А.И., Давиденко А.А., Давиденко М.А., Давиденко Е.В., Пушко Н.И. К расчету прочности сталебетонных плит с внешним армированием стальным профилированным настилом и предварительно напряженной стержневой арматурой // Научный вестник Луганского государственного аграрного университета. 2023. № 3–4 (20–21). С. 269–276. EDN BENCXQ.

42. Давиденко А.И., Артеменко А.А., Борисов С.Д. Оценка огнестойкости по критерию потери несущей способности железобетонных плит перекрытия с внешним армированием // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. 2024. № 3 (81). С. 21–26. EDN ZLFGUW.

43. Бубис А.А., Гизятуллин И.Р., Давиденко А.А., Петросян И.А., Назмеева Т.В., Давиденко А.И. и др. Особенности применения комбинированных сталежелезобетонных перекрытий на основе легких стальных тонкостенных конструкций в сейсмоопасных районах // Бетон и железобетон. 2024. № 6 (625). С. 5–19. DOI: 10.37538/0005-9889-2024-6(625)-5-19. EDN MYQGYR.

Поступила в редакцию 6 июня 2025 г.

Принята в доработанном виде 6 июля 2025 г.

Одобрена для публикации 8 июля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Юлия Александровна Шапошникова** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций, Институт промышленного и гражданского строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2131-2252, РИНЦ ID: 734007, Scopus: 57190858958, ResearcherID: P-8986-2018, ORCID: 0000-0001-7740-9400; yuliatalyzova@yandex.ru;

Евгений Александрович Калинин — аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций, Институт промышленного и гражданского строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2911-0043, ORCID: 0009-0000-6762-5679; Eugene.Kalinin@inbox.ru.

Вклад авторов:

Шапошникова Ю.А. — идея, научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание статьи, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Калинин Е.А. — сбор и обработка материала, написание статьи, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Babalich V.S., Androsov E.N. Steel-reinforced concrete structures and the prospect of their application in the construction practice of Russia. *Advances in Modern Science*. 2017; 4(4):205-208. EDN YROOWX. (rus.).
2. Nikulina O.V., Cymdjankina N.Ju. Analysis of structural solutions for steel-reinforced concrete floors. *Orenburg horizons: past, present, future: collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 275th anniversary of the Orenburg province and the 85th anniversary of the Orenburg region*. 2019; 157-161. EDN WBTOMY. (rus.).
3. Tusnin A.R., Myl'nikov I.V. Quick-assembly units in steel frames of multi-storey buildings. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(6):942-959. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.942-959. EDN KXXGCG. (rus.).
4. Budoshkina K.A., Kuznetsov V.S., Murlysheva Y.A., Ulyamaev A.S., Shaposhnikova Y.A. Analysis of the operation of combined beams in a wide range of loads. *Engineering journal of Don*. 2018; 2(49):169. EDN YATGDB. (rus.).
5. Lu L., Ding Y., Guo Ya., Hao H., Ding S. Flexural performance and design method of the prefabricated RAC composite slab. *Structures*. 2022; 38:572-584. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.02.022
6. Yao G., Chen Y., Yang Y., Ma X., Men W. Investigation on buckling performance of prefabricated light steel frame materials under the action of random defects during construction. *Materials*. 2023; 16(16):5666. DOI: 10.3390/ma16165666
7. Tamrazyan A.G., Arutyunyan S.N. Investigation of initial stresses and deflections of profiled deck arising during the construction of composite floor slabs. *The Safety of the construction Fund of Russia. Problems and solutions*. 2017; 1:139-146. EDN ZXNSCX. (rus.).
8. Zamaliev F.S., Tamrazyan A.G. To calculation of steel-reinforced concrete ribbed plates for refurbished floors. *Building and Reconstruction*. 2021; 5(97):3-15. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-3-15. EDN BDUMYX. (rus.).
9. Bedov A., Shaposhnikova Yu. Bearing capacity of steel-reinforced concrete floor elements before the operation period. *Magazine of Civil Engineering*. 2024; 1(125). DOI: 10.34910/MCE.125.1. EDN HBTNSM.
10. Shaposhnikova Yu.A. Analysis of the influence of various factors on the deflections of profiled flooring during slab concreting. *Engineering journal of Don*. 2024; 5(113):551-568. EDN CORURC. (rus.).
11. Shaposhnikova Yu.A. The influence of various factors on the deflections and strength of profiled sheeting at the stage of concreting a steel-reinforced concrete slab. *Reinforced Concrete Structures*. 2024; 7(3):44-53. DOI: 10.22227/2949-1622.2024.3.44-53. EDN DADHLD. (rus.).
12. Urgalkina D.A. Application of deformation model to calculation of reinforced concrete lines on steel profile sheet. *World Science*. 2019; 6(27):527-531. EDN KGJGTY. (rus.).
13. Zulpuev A.M., Abdullaev U.D., Iranova N.A., Kochkonbaev B.A., Kenzhebaeva B.P. Calculation of strength and movement of slabs steel profiled deckings under local loads. *In the World of Science and Education*. 2025; 1:150-159. DOI: 10.24412/3007-8946-2025-152-150-159. EDN SPRPNZ.
14. Kuznetsov V., Shaposhnikova Yu. Features of calculation and design of complex concrete monolithic slabs. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:02027. DOI: 10.1051/mateconf/201825102027
15. Albarram A., Qureshi J., Abbas A. Effect of Rib Geometry in Steel-Concrete Composite Beams with Deep Profiled Sheeting. *International Journal of Steel Structures*. 2020; 20(3):931-953. DOI: 10.1007/s13296-020-00333-5

16. Chaparanganda E., Lazouski D. Design method for cast in-situ floor slab with external profiled steel deck as reinforcement. *Architectural and construction complex: problems, prospects, innovations*. 2024; 73-83. EDN HCQRUF. (rus.).

17. Vasdravellis G., Uy B., Tan E.L., Kirkland B. Behaviour and design of composite beams subjected to sagging bending and axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015; 110:29-39. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.03.010

18. Almazov V.O., Harutyunyan S.N. Design of Composite Reinforced Concrete Slabs according to Eurocode 4 and Russian Recommendations. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 8:51-65. EDN UGUISR. (rus.).

19. Ahmed I.M., Tsavdaridis K.D. The evolution of composite flooring systems: applications, testing, modelling and Eurocode design approaches. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 155:286-300. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.01.007

20. Konrad M., Kuhlmann U. Headed studs used in trapezoidal steel sheeting according to Eurocode 4. *Structural Engineering International*. 2009; 19(4): 420-426. DOI: 10.2749/101686609789847118

21. Dujmovic D., Androić B., Lukačević I. Hoesch Additive Floor. *Composite Structures According to Eurocode 4*. 2014; 797-824. DOI: 10.1002/9783433604908.ch22

22. Alsharari F., El-Zohairy A., Salim H., El-Sisi A.E. Numerical investigation of the monotonic behavior of strengthened Steel-Concrete composite girders. *Engineering Structures*. 2021; 246:113081. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113081

23. Tamayo J.L.P., Franco M.I., Morsch I.B., Désir J.M., Wayar A.M.M. Some aspects of numerical modeling of steel-concrete composite beams with prestressed tendons. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2019; 16(7). DOI: 10.1590/1679-78255599

24. Trofimov D.S. Research of monolithic floor performance on metal beams with broken adhesion using numerical model. *Young Scientist*. 2022; 21(416):73-78. EDN SSRXIL. (rus.).

25. Bagaev Z.S., Borukaev B.M. Methodology for modeling a steel-reinforced concrete floor with profiled sheeting in the Lira CAD PC. *Strategic development of the innovative potential of industries, complexes and organizations : collection of articles from the X International scientific and practical conference*. 2022; 18-21. EDN EKDSAO. (rus.).

26. Gaiduk S.V., Chudinov Yu.N. Design models of steel-reinforced concrete floors with a monolithic plate on a steel profiled sheet. *Regional aspects of the development of science and education in the field of architecture, construction, land management and cadastres at the beginning of the III millennium : proceedings of the International scientific and practical conference*. 2020; 179-183. EDN XBYUSY. (rus.).

27. Gimranov L.R., Fattakhova A.I. Determination of the characteristics of the steel-reinforced concrete diaphragm model affecting the result of the numerical experiment. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 1:18-25. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.01.18-25. EDN LEKTSZ. (rus.).

28. Reginato L.H., Tamayo J.L.P., Morsch I.B. Finite element study of effective width in steel-concrete composite beams under long-term service loads. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2018; 15(8). DOI: 10.1590/1679-78254599

29. Adamenko V., Dziubko D., Romanysheva O. Stress-strain state investigation of nodes of composite steel-reinforced concrete frame-monolithic buildings using information technology for structural analysis and building information modeling. *Mechanics and Mathematical Methods*. 2024; 6(1):107-123. DOI: 10.31650/2618-0650-2024-6-1-107-123

30. Tonkih G.P., Chesnokov D.A. Strength and ductility evaluation of I-shape shear connectors in composite floors. *Reinforced Concrete Structures*. 2024; 5(1):27-44. DOI: 10.22227/2949-1622.2024.1.27-44. EDN BUVBSZ. (rus.).

31. Tonkih G.P., Chesnokov D.A. Shear resistance of nailed connectors in composite beams with steel decking. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 7:17-23. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.07.17-23. EDN AVBAPK. (rus.).

32. Kocherzhenko V.V., Sapozhnikov P.V., Kuznecov V.V. Experimental planning for the perpendicular shear test of the embossment. *Engineering Journal of Don*. 2023; 11(107):409-425. EDN CMSRFZ. (rus.).

33. Sougata C., Umamaheswari N. Numerical investigation of steel-concrete composite beams using flexible shear connectors. *AIMS Materials Science*. 2022; 9(5):668-683. DOI: 10.3934/mat.2022041

34. Hällmark R., Collin P., Hicks S.J. Post-installed shear connectors: Push-out tests of coiled spring pins vs. headed studs. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 161:1-16. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.06.009

35. Farid B., Boutagouga D. Parametric study of I-shaped shear connectors with different orientations in push-out test. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2021; 15(57):24-39. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.57.03

36. Tipka M., Macecek T., Vaskova J. Analysis of Position Effect of Vertical Load-Bearing Elements for Reinforcement of Steel Reinforced Concrete Floor Structures. *Key Engineering Materials*. 2024; 976:11-20. DOI: 10.4028/p-jmrgs4

37. Maceček T. *Analysis of Position Effect of Vertical Load-bearing Elements for Reinforcement of Steel Reinforced Concrete Floor Structures : Bachelor Thesis*. CTU in Prague, 2023.

38. Suwaed A.S.H., Karavasilis T.L. Demountable steel-concrete composite beam with full-interaction and low degree of shear connection. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020; 171:106152. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106152

39. Colajanni P., Mendola L.L., Monaco A. Review of push-out and shear response of hybrid steel-trussed concrete beams. *Buildings*. 2018; 8(10):134. DOI: 10.3390/buildings8100134

40. Pathirana S.W., Uy B., Mirza O., Zhu X. Bolted and welded connectors for the rehabilitation of composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016; 125:61-73. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.06.003

41. Davidenko A.I., Davidenko M.A., Davidenko A.A., Davidenko E.V., Pushko N.I. To calculate the strength of steel concrete slabs with external reinforcement with profiled steel flooring and prestressed

core reinforcement. *Scientific Bulletin of the Luhansk State Agrarian University*. 2023; 3-4(20-21):269-276. EDN BENCXQ. (rus.).

42. Davidenko A.I., Artemenko A.A., Borisov S.D. Assessment of fire resistance by the criterion of loss of bearing capacity of reinforced concrete floors with external reinforcement. *Vestnik Lugansk Vladimir Dahl State University*. 2024; 3(81):21-26. EDN ZLF-GUW. (rus.).

43. Bubis A.A., Giziattullin I.R., Davidenko A.A., Petrosyan I.A., Nazmeyer T.V., Davidenko A.I. et al. Features of the application of combined steel-reinforced concrete floors based on lightweight steel thin-walled structures in seismic-prone regions. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2024; 6(625):5-19. DOI: 10.37538/0005-9889-2024-6(625)-5-19. EDN MYQGY. (rus.).

Received June 6, 2025.

Adopted in revised form on July 6, 2025.

Approved for publication on July 8, 2025.

B I O N O T E S: **Yuliya A. Shaposhnikova** — Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced concrete and Masonry Structures, 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: 2131-2252, ID RSCI: 734007, Scopus: 57190858958, ResearcherID: P-8986-2018, ORCID: 0000-0001-7740-9400; yuliatyazova@yandex.ru;

Evgeny A. Kalinin — postgraduate studies of the Department of Reinforced concrete and Masonry Structures, 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: 2911-0043, ORCID: 0009-0000-6762-5679; Eugene.Kalinin@inbox.ru.

Contribution of the authors:

Yuliya A. Shaposhnikova — idea, supervision, conceptualization, methodology, writing of the article, scientific editing of the text, conclusions.

Evgeny A. Kalinin — data gathering and processing, writing of the article, conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

Экспериментальные исследования дюбельных соединений
элементов стальных конструкций

Александр Романович Туснин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Соединения элементов стальных конструкций выполняются с использованием заклепок, болтов и сварки. Для крепления тонколистовых стальных оболочек мембран, особенно оцинкованных, в качестве элемента соединения могут применяться высокопрочные дюбели, устанавливаемые при помощи пороховых зарядов или запрессовывания в предварительно сделанные отверстия в соединяемых элементах.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования проведены с использованием образцов трех типов. Образцы состояли из стальных оцинкованных листов толщиной 0,5 и 0,7 мм, которые крепились к стальной пластине толщиной 3 мм при помощи высокопрочных дюбелей 3 мм. Рассмотрена возможность использования этих дюбелей при толщине стальных пластин 6 и 10 мм, в том числе в предварительно просверленные отверстия диаметром 2 мм.

Результаты. Дюбели диаметром 3 мм пробивали стальную пластину толщиной 3 мм и прочно крепили оцинкованный лист толщиной 0,5 и 0,7 мм. Установлен характер разрушения образцов в зависимости от числа и расположения дюбелей. При двух дюбелях наблюдалось разрушение стального оцинкованного листа в районе дюбелей. При четырех дюбелях оцинковка разрушалась вне дюбельного соединения в виде разрыва стального листа. Определено, что в пластины толщиной 6 и 10 мм дюбели диаметром 3 мм на всю длину не входят. При устройстве в этих пластинах отверстий диаметром 2; 2,5 и 3 мм дюбели удастся установить на всю длину.

Выводы. Экспериментальные исследования дюбельных соединений тонколистовой оцинкованной стали показали, что даже бытовые дюбели обладают высокой прочностью и стабильностью параметров и могут использоваться для соединения несущих элементов стальных конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стальные конструкции, пороховой дюбель, прочность соединения, оцинкованный лист, испытания конструкций

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Туснин А.Р. Экспериментальные исследования дюбельных соединений элементов стальных конструкций // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 10. С. 1522–1533. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1522-1533

Автор, ответственный за переписку: Александр Романович Туснин, tusninar@mgsu.ru.

Experimental studies of dowel connections
of steel structural elements

Aleksandr R. Tusnin

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

ABSTRACT

Introduction. Connections of steel construction elements are made using rivets, bolts and welding. To fasten thin sheet steel membrane sheathing, especially galvanized, high-strength dowels can be used as a connection element, installed by means of gunpowder charges or pressing into pre-made holes in the elements to be connected.

Materials and methods. Experimental studies were carried out using three types of specimens. The specimens consisted of 0.5 and 0.7 mm thick galvanized steel sheets, which were fixed to a 3 mm thick steel plate using 3 mm high-strength dowels. The possibility of using these dowels with 6 and 10 mm thick steel plates was considered, including into pre-drilled holes with a diameter of 2 mm.

Results. Dowels with a diameter of 3 mm pierced a steel plate with a thickness of 3 mm and firmly fixed a galvanized sheet with a thickness of 0.5 and 0.7 mm. The failure pattern of the specimens depending on the number and location of the dowels was determined. With two dowels, the steel galvanized sheet was observed to fail in the area of the dowels. At four dowels the galvanized steel sheet was destroyed outside the dowel joint in the form of steel plate rupture. It was found that the full length of 3 mm diameter dowels did not fit into the 6 and 10 mm thick plates. When holes with diameters of 2, 2.5 and 3 mm are made in these plates, the full length of the dowels can be installed.

Conclusions. Experimental studies of dowel joints of thin-sheet galvanized steel have shown that even household dowels have high strength and stability of parameters and can be used to connect load-bearing elements of steel structures.

KEYWORDS: steel structures, powder dowel, joint strength, galvanized sheet, structural testing

FOR CITATION: Tusnin A.R. Experimental studies of dowel connections of steel structural elements. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(10):1522-1533. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1522-1533 (rus.).

Corresponding author: Aleksandr R. Tusnin, tusninar@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Заводские или монтажные соединения современных стальных конструкций чаще всего осуществляются с использованием сварки или болтов [1–3]. Ранее достаточно успешно, в том числе для самых ответственных конструкций, применялись заклепочные соединения [4]. Заклепочные соединения успешно используются в авиастроении [5]. Крепление облицовок и отделочных слоев может выполняться с помощью вытяжных заклепок [6]. Проведены исследования по применению вытяжных заклепок в несущих конструкциях [7, 8]. В композитных (стале-железобетонных) конструкциях для объединения стальной балки с бетонной плитой используют анкерные упоры, выполняемые часто в виде цилиндрических стад-болтов, приваренных к верхней полке балки. Стад-болты в этом случае работают как дюбели, взаимодействующие с бетоном за счет трения [9]. Крепление различных облицовок к несущим конструкциям может проводиться с использованием дюбелей, фиксируемых в несущей конструкции путем сил трения [10, 11]. Дюбели находят применения для соединения элементов стальных конструкций, в том числе для крепления тонких металлических листов к прокатным или сварным профилям. Дюбели могут устанавливаться в предварительно произведенные в соединяемых деталях отверстия [12]. В дюбельных соединениях высокопрочный стальной дюбель под действием пороховых газов пробивает тонкий стальной лист, входит в более толстый профиль и обеспечивает прочность соединения. Дюбельные соединения обычно используются для дискретного крепления обшивки к несущим конструкциям. В тонколистовой обшивке усилия невелики, поэтому проблем с обеспечением прочности дюбельного соединения в таких конструкциях не возникает.

В покрытиях зданий и сооружений применяются мембранные конструкции, в которых пролетную часть выполняют из тонкой стальной оболочки (мембраны) толщиной 0,5–6 мм и крепят к прокатному или сварному стальному опорному контуру [13–16]. Мембрану доставляют на строительную площадку в виде рулонов. Заводские соединения в рулонах осуществляются при помощи автоматической сварки, качество и прочность таких швов гарантированы. Несмотря на большую протяженность заводских сварных соединений, использование автоматизированной сварки обеспечивает высокую производительность при изготовлении рулонов на заводе. При монтаже конструкций необходимо выполнять крепление мембраны к опорному контуру и рулонов мембраны друг к другу. Для сварки протяженных сварных соединений при использовании тонких стальных листов требуется применение автоматической или полуавтоматической сварки в среде защитных газов [17]. Развитие технологии сварки привело к использованию лазеров, что обеспечивает вы-

полнение качественных сварных соединений [18, 19]. Длина монтажных соединений по контуру равна его периметру, а в пролете — числу монтажных стыков на пролет конструкции. Необходимость создания протяженных монтажных швов тонких стальных листов друг с другом и с опорным контуром затрудняет процесс сборки конструкции на строительной площадке. При этом надо обеспечить равнопрочность сварного соединения и мембраны. Использование вместо сварки протяженных болтовых соединений значительно увеличивает трудоемкость соединения.

Мембрана может выполняться из оцинкованных стальных листов толщиной 0,5–0,9 мм [20]. При монтажной сварке в этом случае возникают дополнительные сложности, обусловленные трудностями формирования сварного соединения тонких оцинкованных листов. Для крепления оцинкованных листов к опорному контуру и присоединения листов друг к другу могут использоваться дюбельные соединения. В отличие от облицовки напряжения в мембране могут достигать предела текучести, что ведет к действию на дюбельное соединение больших усилий. Требуется при проектировании такого соединения установить количество дюбелей, обеспечивающих прочность соединения до достижения предела текучести в стальном листе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В НИУ МГСУ проведены экспериментальные исследования прочности дюбельных соединений оцинкованной стали толщиной 0,5 и 0,7 мм. Испытано шесть образцов трех типов. Листы оцинкованной стали крепились при помощи дюбелей к стальным листам толщиной 3 мм. Оцинкованные листы и листы толщиной 3 мм имели ширину 51 мм. Для соединения использовались дюбели диаметром 3 мм китайского производства, установка дюбеля осуществлялась монтажным пистолетом TUOSEN (рис. 1).

В образцах первого типа соединение выполнено при помощи двух дюбелей, расположенных вдоль оси оцинкованного листа. Дюбели в этих образцах установлены с шагом 25 мм, первый дюбель



Рис. 1. Дюбель (а) и пистолет для забивки дюбелей (b)
Fig. 1. Dowel (a) and dowel hammer gun (b)

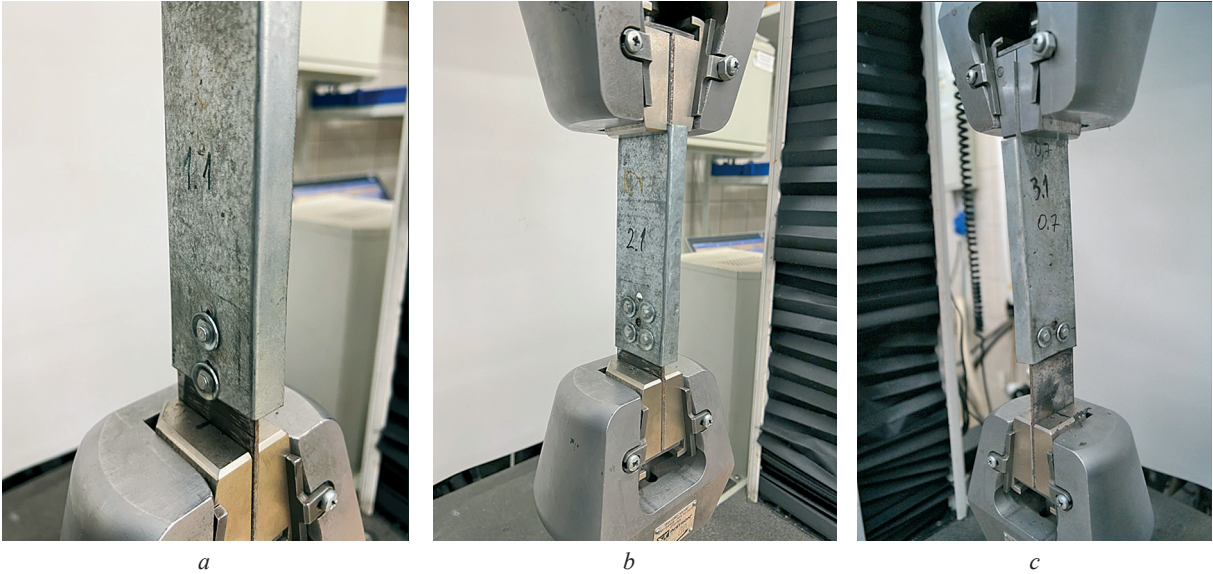


Рис. 2. Образцы первого типа (a); второго типа (b) и третьего типа (c), установленные в зажимы для испытания на растяжение

Fig. 2. Specimens of the first type (a); the second type (b) and the third type (c) installed in clamps for tensile testing

установлен на расстоянии 10 мм от края оцинкованного листа. Во втором типе соединения использовано четыре дюбеля, установленных с шагом по длине и ширине соединения 20 мм, расстояние от края листа до первого ряда дюбелей 12 мм. В третьем типе соединения использовано два дюбеля, расположенных в ряд перпендикулярно продольной оси образца на расстоянии 15 мм от края оцинкованного листа с шагом 20 мм. На рис. 2 представлены образцы первого, второго и третьего типов.

Кроме числа дюбелей варьировалась и толщина оцинкованной стали. В табл. 1 представлены основные параметры испытанных образцов.

Дюбельное соединение выполнялось в следующей последовательности. Соприкасающиеся поверхности металлических деталей очищались от пыли, грязи и ржавчины. Стальной лист толщиной 3 мм укладывался на деревянный брус толщиной 30 мм, что позволило при установке дюбелей исключить неплотное прилегание деталей друг к другу. Деталь из оцинкованной стали с разметкой мест для установки дюбелей накладывалась на стальной лист и временно фиксировалась. Затем к ней подводился и позиционировался в место установки дюбель, установленный в монтажный пистолет. После выверки положения дюбеля осуществлялся нажим на ручку пистолета, что вело к воспламенению порохового заряда, дюбель пробивал соединяемые детали и прочно фиксировал их друг относительно друга. Принятая технология изготовления образцов позволила получить соединение без зазоров между оцинковкой и стальной пластиной, дюбели пробili соединяемые детали на всю толщину, плотно прижали оцинкованный лист к стальной пластине. Необходимо отметить, что в пластине толщиной 3 мм дюбели фиксировались без люфтов.

Кроме крепления оцинкованной стали к стальным пластинам толщиной 3 мм изучена возможность использования дюбельного соединения с более толстыми стальными листами. Для этого была проведена пристрелка дюбелей к стальным листам из стали С345 толщиной 6 и 10 мм. Пристрелка осуществлена непосредственно к листам указанной толщины без прикрепляемой оцинкованной стали.

Для облегчения дюбельного соединения с листами толщиной 6 и 10 мм рассмотрена возможность установки дюбелей в отверстия, предварительно выполненные в стальных листах. С учетом диаметра дюбеля (3 мм) отверстия в стальных ли-

Табл. 1. Параметры испытанных образцов

Table 1. Parameters of the tested specimens

Тип образца Parameters of the tested specimens	Марка образца Specimen brand	Толщина оцинкованной стали, мм Thickness of galvanized steel, mm	Толщина стальной пластины, мм Thickness of the steel plate, mm	Число дюбелей Number of dowels
1-й тип Type 1	1,1	0,7	3	2
	1,2	0,5	3	2
	1,3	0,5	3	2
2-й тип Type 2	2,1	0,5	3	4
	2,2	0,7	3	4
	2,3	0,5	3	4
3-й тип Type 3	3,1	0,7	3	2
	3,2	0,5	3	2
	3,3	0,7	3	2
	3,4	0,5	3	2

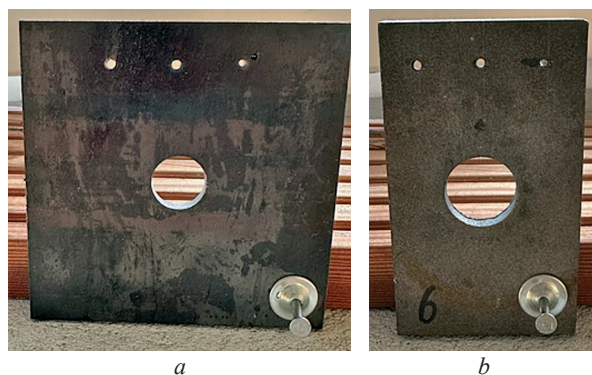


Рис. 3. Пластины с отверстиями слева направо диаметром 3; 2,5 и 2 мм при толщине 6 мм (а) и 10 мм (b)

Fig. 3. Plates with holes from left to right with diameters of 3, 2.5 and 2 mm with a thickness of 6 mm (a) and 10 mm (b)

стах осуществлялись диаметром 2; 2,5 и 3 мм. После выполнения отверстий в них производилась установка дюбелей. На рис. 3 показаны стальные пластины с отверстиями.

С целью определения несущей способности дюбельного соединения, обусловленной прочностью дюбеля на срез, изготовлен образец, в котором пластина толщиной 3 мм крепилась одним дюбелем к пластине толщиной 6 мм. Дюбель устанавливался с предварительным формированием в соединяемых деталях отверстий. В пластине толщиной 3 мм диаметр отверстия был 3 мм, в пластине толщиной 6 мм диаметр отверстия — 2,5 мм. Наличие отверстий обеспечило проникновение дюбеля в соединение на всю глубину и надежную фиксацию дюбеля в пластине толщиной 6 мм. На рис. 4 представлен образец однодюбельного соединения пластин 3 и 6 мм.

Испытания проводились в Центре коллективного пользования НИУ МГСУ с участием специа-

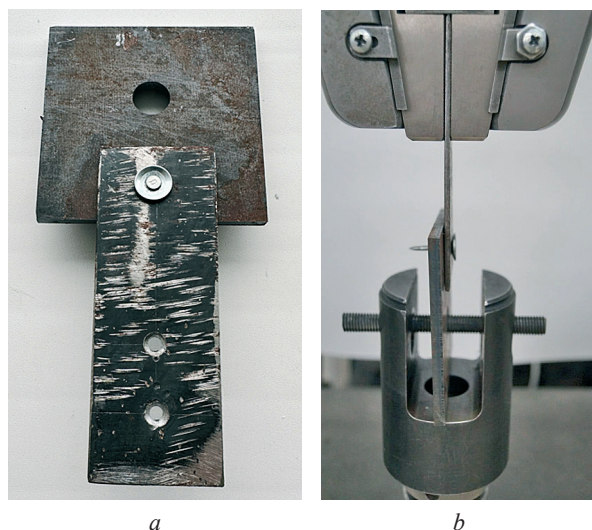


Рис. 4. Однодюбельное соединение пластин толщиной 3 и 6 мм: общий вид (а); образец в зажимах испытательной машины (b)

Fig. 4. Single-tube connection of plates 3 and 6 mm thick: general view (a); the specimen in the clamps of the testing machine (b)

листов Научно-исследовательского института экспериментальной механики. При испытаниях образцы устанавливались в зажимы для испытания на растяжение. При растяжении дюбельное соединение работало на сдвиг. Испытание образцов из оцинкованной стали позволило получить экспериментальные данные о возможности передачи на стальной профиль усилий, сопоставимых с прочностью оцинкованной стали. Испытание однодюбельного соединения пластин толщиной 3 и 6 мм дало возможность определить предельную нагрузку, передаваемую дюбелем в соединении при работе на срез. Испытания проводились на разрывной машине Instron 3382.

В процессе испытаний нагрузка изменялась от нуля до максимального значения. При загрузке фиксировались перемещения зажимов и соответствующий уровень нагрузки. Нагружение велось до разрушения образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенных испытаний установлен характер разрушения образцов и предельные нагрузки, воспринимаемые при этом.

Все образцы первого типа потеряли несущую способность из-за разрушения оцинкованного листа как при толщине 0,5 мм, так и при 0,7 мм. Расположение дюбелей по одной линии вдоль действующего усилия привело к последовательному вырыву полосы материала из тонкого листа шириной примерно 3 мм. После того как отдельные области поврежденного металла объединялись, наступало полное исчерпание прочности соединения. На рис. 5 показаны характерные повреждения для образцов первого типа.

После разрушения у всех образцов 1-го типа зафиксировано наличие под шайбами дюбелей фрагментов оцинковки. Все дюбели сохранили свое положение и остались прочно закрепленными в листах толщиной 3 мм. Испытания образцов 1-го типа позволили установить зависимость прочности соединения от толщины оцинкованных листов. На рис. 6 представлены зависимости «перемещение — нагрузка» для испытанных образцов 1-го типа.

Максимальная прочность соединения была зафиксирована для образца 1.1 с толщиной оцинковки 0,7 мм. Эта нагрузка составила 8,57 кН при перемещении 3,19 мм. Два других образца разрушились при нагрузке, существенно меньшей: образец 1.2 при нагрузке 5,57 кН и перемещении 2,5 мм, образец 1.3 при нагрузке 6,63 кН и перемещении 3,87 мм. Для образцов 1.1. и 1.2 после достижения предельной нагрузки и образования областей повреждения металла наблюдалось непрерывное снижение нагрузки, воспринимаемой образцом, сопровождаемое перемещениями 5,08 мм (образец 1.1) и 5,84 мм (образец 1.2). У образца 1.3 после достижения максимальной нагрузки происходило снижение нагрузки, воспринимаемой образцом до 6,37 кН, а затем она



Рис. 5. Характерные повреждения оцинкованного листа в образцах 1-го типа

Fig. 5. Characteristic damages of galvanized sheet in specimens of type 1

начала снова расти из-за образования зон скомканного, но не разрушенного металла оцинковки. Снятие металла сопровождалось ростом нагрузки до 7,9 кН и перемещениями 6,74 мм, после чего при перемещениях происходило полное разрушение образца.

Дюбельное соединение во всех образцах второго типа сохранило свою несущую способность до достижения максимальной нагрузки. Все образ-

цы данного типа разрушились в результате разрыва оцинкованной стали перед или непосредственно в зажимах. На рис. 7 показаны характерные повреждения образца 2-го типа.

После разрыва оцинковки не было зафиксировано сдвигов оцинкованной стали в дюбельном соединении. Это свидетельствовало о более высокой прочности дюбельного соединения при использовании 4 дюбелей по сравнению с прочностью оцинкованной стали. На рис. 8 приведены зависимости «перемещение – нагрузка» для испытанных образцов 2-го типа.

Образцы 2.1 и 2.3, выполненные с применением оцинковки толщиной 0,5 мм, имели почти одинаковую несущую способность, равную примерно 10 кН при перемещениях в районе 3,5 мм. Образец 2.2 показал более высокую несущую способность 12,67 кН. Графики «перемещение – нагрузка» имеют характерную форму. На первом этапе перемещения нарастают, затем наблюдается участок с небольшим изменением нагрузки и значительными перемещениями, после достижения максимальной нагрузки происходил разрыв оцинкованной стали и полное исчерпание несущей способности.

Образцы третьего типа при толщине оцинкованного листа 0,5 и 0,7 мм потеряли несущую способность из-за разрушения оцинкованного листа в зоне контакта с дюбелями. Разрушение соединения произошло из-за вырыва полосы материала из тонкого оцинкованного листа. Ширина повреждения оцинковки, как и в первом случае, составила около 3 мм. После того как отдельные области поврежденного листа доходили до его края, наступало полное исчерпание прочности соединения. На рис. 9 представлены характерные повреждения для образцов третьего типа.

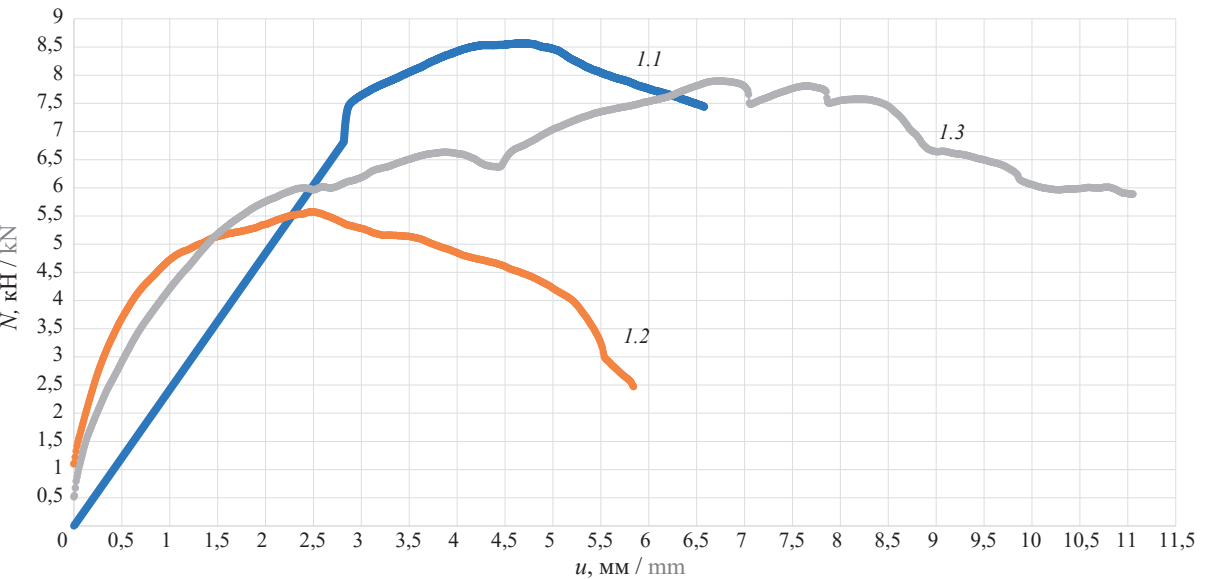


Рис. 6. Графики «перемещение – нагрузка» для образцов 1-го типа

Fig. 6. Displacement – load graphs for type 1 specimens



Рис. 7. Характерные повреждения оцинкованного листа в образцах 2-го типа

Fig. 7. Characteristic damages of galvanized sheet in specimens of type 2

Характер разрушения оцинкованных листов в образцах третьего типа похож на ранее выявленный характер разрушения образцов первого типа. На рис. 10 показаны зависимости «перемещение – нагрузка» для испытанных образцов 3-го типа.

Как и ожидалось, большей прочностью обладали образцы, выполненные из оцинкованной стали толщиной 0,7 мм. Прочность соединения для образцов из оцинкованной стали толщиной 0,7 мм составила от 8,76 до 8,9 кН. При толщине 0,5 мм отмечалась прочность от 6,52 до 7,46 кН. При толщине оцинковки 0,7 мм до перемещений 1,5 мм, а при толщине 0,5 мм до перемещений 1 мм образцы работали без видимых повреждений соединения. После этого в соединении развивались повреждения и наблюдался более быстрый рост перемещений по сравнению с ростом нагрузки. Полное исчерпание прочности наблюдалось в образцах толщиной

0,7 мм при перемещениях 5,85–6,48 мм, а в образцах толщиной 0,5 мм при перемещениях 4,04–4,51 мм.

В табл. 2 представлены результаты испытаний образцов дюбельных соединений.

Для всех испытанных образцов выявлена ожидаемая зависимость величины несущей способности от толщины оцинкованного металла. Именно разрушение оцинковки определяло несущую способность образцов. В образцах первого и третьего типов оцинковка разрушалась непосредственно в зоне соединения, в образцах второго типа прочность дюбельного соединения превосходила прочность оцинкованной стали. При этом увеличение толщины оцинкованной стали более существенно сказалось на прочности образцов первого и второго типов, чем на прочности образцов второго типа. Это обусловлено меньшей прочностью стали, из которой изготовлена оцинковка толщиной 0,7 мм. При двух дюбелях несущая способность не зависела от того, как расположены дюбели — по линии вдоль действия силы или по линии перпендикулярной ей.

Отдельных испытаний на прочность листов оцинкованной стали и стальных пластин толщиной 3 мм не проводилось. О прочностных свойствах оцинкованной стали можно судить по результатам испытаний образцов второго типа, которые разрушились по металлу оцинковки. Установлено отсутствие стадии самоупрочнения при растяжении оцинкованной стали и малое отличие предела текучести от временного сопротивления. Анализ графиков «перемещение – нагрузка» показал, что предел текучести составляет примерно 0,8–0,9 от временного сопротивления, что характерно для сталей повышенной прочности. Испытания стальных пластин

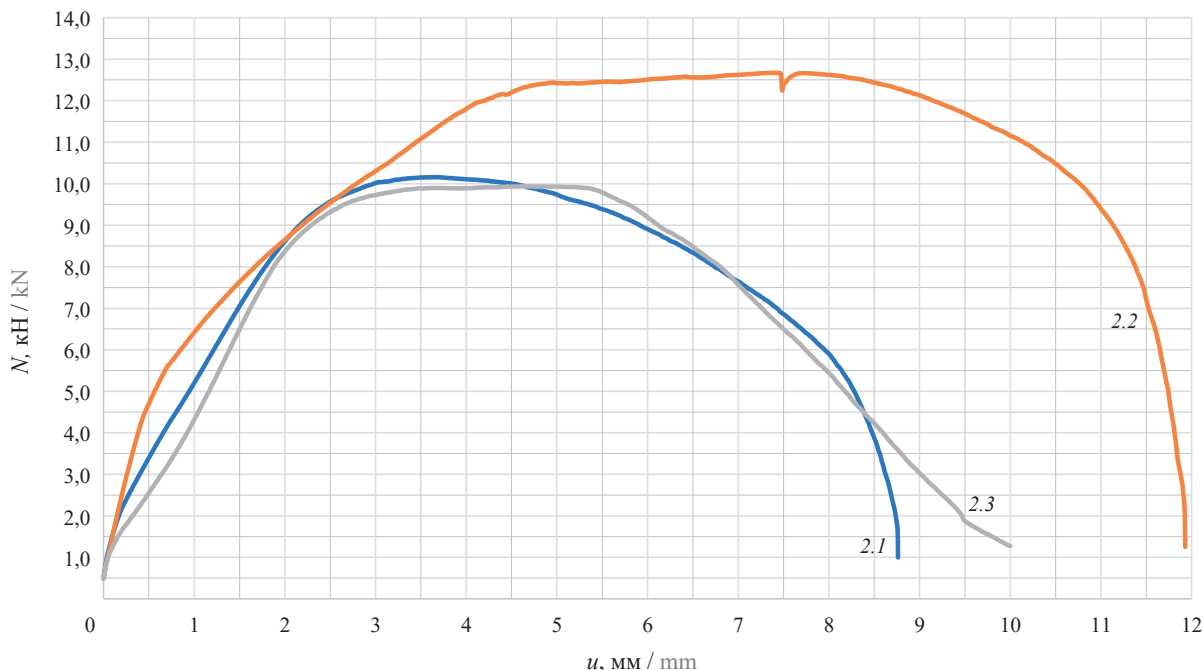


Рис. 8. Графики «перемещение – нагрузка» для образцов 2-го типа

Fig. 8. Displacement – load graphs for type 2 specimens



Рис. 9. Характерные повреждения оцинкованного листа в образцах 3-го типа
Fig. 9. Characteristic damages of galvanized sheet in specimens of type 3

толщиной 3 мм не понадобилось в связи с избыточной прочностью этих элементов по сравнению с прочностью дюбельного соединения или листов оцинкованной стали.

Рассмотрена возможность использования дюбельного соединения для крепления тонких стальных листов к стальным прокатным или сварным профилям, выполненным из более толстых листов. Выявлено, что используемые дюбели не смогли пробить листы из стали С345 толщиной 6 и 10 мм. На рис. 11 показаны стальные пластины с внедренными в них дюбелями, которые не пробili пластины толщиной 6 и 10 мм.

Дюбели, использованные в испытанных соединениях, стальные листы толщиной 6 и 10 мм из стали С345 пробить на всю толщину не смогли. В листы толщиной 6 и 10 мм дюбели входили на одинаковую глубину 5,8 мм. Недостаточная пробивная способность выбранных дюбелей не позволяет использовать их для крепления тонколистовой стали к профилям, применяемым в строительстве.

Изучена возможность установки дюбелей в предварительно просверленные в пластинах толщиной 6 и 10 мм отверстия диаметром 2; 2,5 и 3 мм, предварительно выполненные в стальных листах. После устройства отверстий дюбель позиционировался в отверстие и производилась установка дюбеля.

При установке дюбеля в отверстие диаметром 3 мм из-за большой скорости дюбеля, вылетающего из монтажного пистолета под действием пороховых газов, наблюдается отрыв головки дюбеля от его ствола после контакта головки с пластиной толщиной 6 и 10 мм. Это происходит из-за отсутствия со-

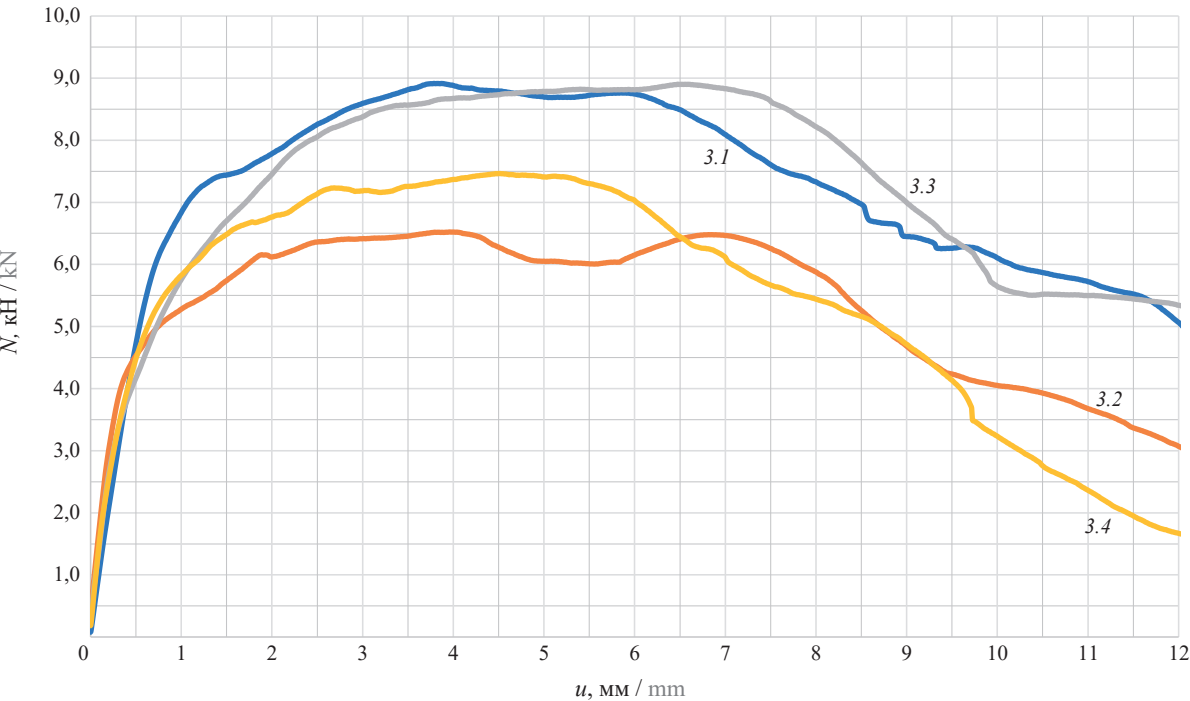


Рис. 10. Графики «перемещение – нагрузка» для образцов 3-го типа
Fig. 10. Displacement – load graphs for 3 types of specimens

Табл. 2. Параметры испытанных образцов
Table 2. Parameters of the tested specimens

Марка образца Specimen brand	Толщина оцинкованной стали, мм Thickness of galvanized steel, mm	Перемещения при максимальной нагрузке, мм Displacement at maximum load, mm	Предельная нагрузка, кН Maximum load, kN	Предельные нормальные напряжения, МПа Maximum normal Stress, MPa
1.1	0,7	3,19	8,57	245
1.2	0,5	2,50	5,57	223
1.3	0,5	3,87	6,63	265
2.1	0,5	3,63	10,16	406
2.2	0,7	7,38	12,67	362
2.3	0,5	4,63	9,94	398
3.1	0,7	5,85	8,76	250
3.2	0,5	4,04	6,52	261
3.3	0,7	6,48	8,90	254
3.4	0,5	4,51	7,46	298

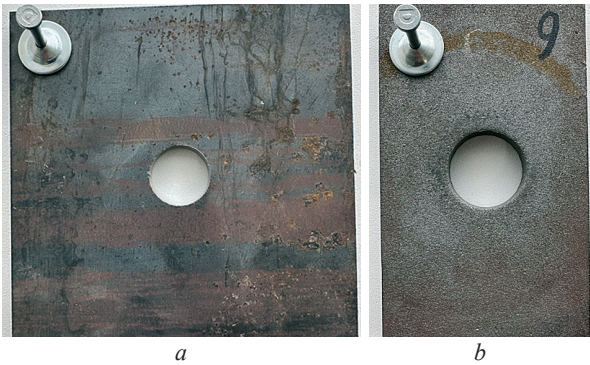


Рис. 11. Вид стальных пластин толщиной 6 мм (а) и 10 мм (b) с дюбелями, установленными без предварительно просверленных отверстий
Fig. 11. View of 6 mm (a) and 10 mm (b) thick steel plates with dowels installed without pre-drilled holes



Рис. 12. Оторванные головки дюбелей после их установки в отверстия диаметром 3 мм
Fig. 12. Detached dowel heads after their installation in holes with a diameter of 3 mm

противления стали в отверстия и не позволяет при диаметре отверстия 3 мм использовать дюбельное соединение с дюбелями диаметром 3 мм. На рис. 12 показаны головки, оторванные от ствола дюбеля, при установке дюбеля в отверстие диаметром 3 мм.

На рис. 13 представлены стальные пластины с отверстиями после установки дюбелей.

На рис. 13, кроме дюбелей, установленных в отверстия диаметром 2 и 2,5 мм, видны отверстия диаметром 3 мм, в которых произошло разрушение дюбелей при установке. Также видны дюбели, не пробившие пластины без отверстий. В пластине толщиной 6 мм дюбели в отверстия диаметром 2 и 2,5 мм удалось установить на полную длину. В пластину толщиной 10 мм на полную длину дюбель вошел в отверстие диаметром 2,5 мм, а в отверстие диа-

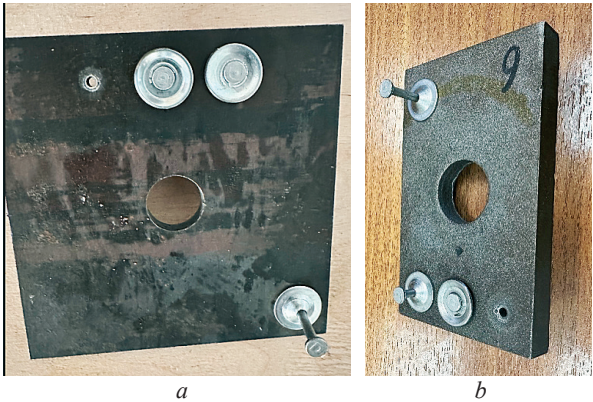


Рис. 13. Вид стальных пластин толщиной 6 мм (а) и 10 мм (b) с дюбелями, установленными в отверстия диаметром 2 и 2,5 мм
Fig. 13. View of steel plates with a thickness of 6 mm (a) and 10 mm (b) with dowels installed in holes with a diameter of 2 and 2.5 mm



Рис. 14. Вид стальных пластин и дюбеля после разрушения однодюбельного соединения
Fig. 14. View of the steel plates and dowels after the destruction of the single-tube connection

метром 2 мм дюбель вошел примерно на половину длины.

Испытание однодюбельного соединения пластин толщиной 3 и 6 мм подтвердило работоспособность такого узла. Разрушение соединения произошло в результате среза дюбеля. На рис. 14 показан разрушенный образец однодюбельного соединения пластин толщиной 6 и 10 мм.

Предельная нагрузка на образец однодюбельного соединения составила 9,73 кН. Разрушение произошло из-за среза дюбеля. Поверхность среза получилась гладкой. Заметно деформирование стенок отверстия в пластине толщиной 3 мм (рис. 14). Характер повреждений деталей в однодюбельном соединении соответствует теоретическим представлениям о работе таких соединений.

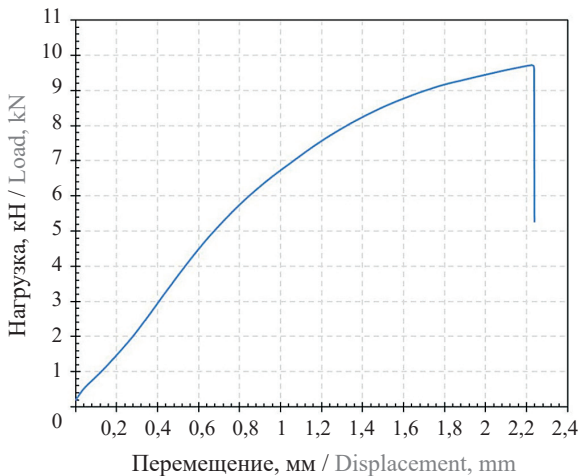


Рис. 15. Зависимость «перемещение – нагрузка» для однодюбельного соединения

Fig. 15. The dependence of “displacement – load” for a single-line connection

На рис. 15 представлена зависимость «перемещение – нагрузка» для однодюбельного соединения.

До нагрузки 5 кН зависимость перемещений от нагрузки близка к линейной. Затем перемещения нарастают быстрее. Более быстрый рост перемещений происходит из-за развития сдвигающих деформаций в дюбеле и смятия стенок отверстия в пластине толщиной 3 мм. При нагрузке 9,73 кН отмечается срез дюбеля и соединение разрушается.

Касательные напряжения в сечении среза при разрушении составили: $9730 \cdot 4 / (3,14 \cdot 3^2) = 1377$ МПа. Высокие разрушающие напряжения в сечении дюбеля обусловлены высокой прочностью стали дюбеля, что необходимо для уверенного пробития стальных листов. Высокая прочность дюбеля подтверждается тем, что при установке после проникновения в стальные пластины дюбель во всех случаях сохранял свою форму, на нем не замечены следы деформации, острие не затупилось, не согнулось.

Напряжения смятия в стенках отверстия стальной пластины толщиной 3 мм составили: $9730 / (0,5 \times 3,14 \cdot 3 \cdot 3) = 689$ МПа, что несколько меньше прочности на смятие для болтов класса А с плотным примыканием болта к стенкам отверстия (735 МПа для стали С345).

В целом проведенные испытания подтвердили работоспособность однодюбельного соединения и возможность применения дюбельных соединений в несущих конструкциях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования дюбельных соединений тонколистовой оцинкованной стали дали возможность установить следующее.

Даже бытовые дюбели обладают высокой прочностью и стабильностью параметров, что позволяет

с успехом их использовать для соединения несущих элементов стальных конструкций.

Дюбельное соединение с применением двух дюбелей не позволяет нагружать тонколистовую оцинкованную сталь до исчерпания ее прочности. При использовании четырех дюбелей несущая способность соединения превышает прочность тонколистовой оцинкованной стали толщиной 0,5 и 0,7 мм.

Определена возможность с использованием дюбелей выполнять монтажные соединения тонколистовых (мембранных) оболочек, поставляемых на строительную площадку в рулонах, с контуром и отдельных рулонов между собой.

Выявлена невозможность пристрелки дюбеля в пластины из стали С345 толщиной 6 и 10 мм на полную длину из-за недостаточной пробивной способности рассматриваемых дюбелей.

При установке дюбелей в предварительно выполненные отверстия диаметром 3 мм происходит отрыв головки дюбеля и невозможность фиксации прикрепляемых деталей.

В отверстия диаметром 2 и 2,5 мм при толщине пластины 6 мм дюбели входят на всю длину и надежно фиксируются.

При толщине пластины 10 мм на полную длину дюбели устанавливаются в отверстия диаметром 2,5 мм, в отверстия диаметром 2 мм дюбели входят только наполовину длины.

Дюбели можно использовать для соединения пластин толщиной 3 и 6 мм. Перед установкой дюбеля в пластине толщиной 3 мм выполнялось отвер-

стие диаметром 3 мм, а в пластине толщиной 6 мм отверстие диаметром 2,5 мм. Испытания однодюбельного соединения показали высокую несущую способность, что позволяет применять дюбели в соединениях несущих конструкций.

Дюбельные соединения в виде вводимых в предварительно просверленные отверстия в деталях высокопрочных сердечников, пластически деформирующих стенки отверстия, могут служить альтернативой фрикционным соединениям на высокопрочных болтах.

К преимуществам дюбельных соединений можно отнести простоту подготовки поверхностей соединяемых деталей, быстроту установки дюбеля (пороховым зарядом или монтажным прессом), отсутствие необходимости контроля за предельным моментом или углом закручивания, невозможность сдвигов до исчерпания прочности дюбеля на срез или соединяемых деталей на смятие.

Простота выполнения дюбельных соединений, возможность применения более мощных пороховых зарядов и дюбелей большего диаметра позволяют рассматривать такие соединения как одно из перспективных направлений по совершенствованию узлов металлических конструкций.

Продолжение исследований дюбельных соединений, разработка требований к высокопрочным дюбелям, технологии и оснастки для выполнения дюбельных соединений являются перспективными и представляют значительный научный и практический интерес.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kyvelou P., Huang C., Li J., Gardner L. Residual stresses in steel I-sections strengthened by wire arc additive manufacturing // Structures. 2024. Vol. 60. P. 105828. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105828
2. Guo X., Kyvelou P., Ye J., Teh L.H., Gardner L. Experimental study of DED-arc additively manufactured steel double-lap shear bolted connections // Engineering Structures. 2023. Vol. 281. P. 115736. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2023.115736
3. Vatin N., Gubaydulin R., Tingaev A. Flange connections with high-strength bolts with technological heredity of bolts // Magazine of Civil Engineering. 2020. No. 7 (99). DOI: 10.18720/MCE.99.12. EDN QFVYPO.
4. Протасов К.Г., Теплицкий А.В., Крамарева С.Я., Никитин М.К. Металлические мосты : учебное пособие. М. : Транспорт, 1973. 352 с.
5. Белов В.К., Калюта А.А., Рудзей Г.Ф. Обеспечение усталостной долговечности авиационных конструкций технологическими методами : монография. Новосибирск : НГТУ, 2012. 404 с. EDN RPSAKJ.
6. Козлов И.Е. Применение соединений ЛСТК на вытяжных заклепках // Научному прогрессу — творчество молодых. 2017. № 4. С. 30–32. EDN ZVHCPI.
7. Туснина О.А. Соединения кровельных сэндвич-панелей с тонкостенными гнутыми прогонами, выполняемые на вытяжных заклепках // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 3. С. 14–16. EDN OHWQRL.
8. Мысак В.В., Туснина О.А., Данилов А.И., Туснин А.Р. Особенности работы соединений металлических элементов на заклепках различных типов // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 82–91. EDN RYXTNN.
9. Lacki P., Kasza P., Adamus K. Optimization of composite dowels shape in steel-concrete composite floor // Composite Structures. 2019. Vol. 222. P. 110902. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.110902
10. Куцев И.Е., Петров М.А. Составные дюбели для анкеров в слабонесущих ограждающих конструкциях // Экономика строительства. 2023. № 10. С. 132–135. EDN VOGFOQ.

11. Гукова М.И., Попелянский Ю.Л., Марков Е.С. Оценка прочности соединений металлических элементов строительных конструкций на дюбелях // Промышленное строительство. 1978. № 6. С. 23–25. EDN ZIFFQZ.

12. Larsson G., Serrano E., Gustafsson P.J., Danielsson H. Dowel design of the shear plate dowel joint // Engineering Structures. 2020. Vol. 209. P. 110296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110296

13. Еремеев П.Г. Тонколистовые мембраны — новый вид легких металлических конструкций (ЛМК) покрытий // Монтажные и специальные работы в строительстве. 1992. № 7. С. 14–16. EDN YZHETB.

14. Еремеев П.Г. Тонколистовые металлические мембранные конструкции покрытий: исследование, строительство // Вестник НИЦ Строительство. 2017. № 3 (14). С. 43–57. EDN ZCDGZN.

15. Фарфель М.И. Покрытия из стальных мембран — эффективный тип висячих конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 2024. № 4 (315). С. 58–67. DOI: 10.37538/0039-2383.2024.4.58.67. EDN ZOTSNM.

16. Tushin A. Experimental research of a membrane roof with the membrane eccentrically fixed

on a thin-walled open-profile supporting contour // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 39. P. 102256. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102256

17. Shehab A.A., Nawi S.A., Al-Rubaiy A., Hammoudi Z., Hafedh S.A., Abass M.H. et al. CO₂ laser spot welding of thin sheets AISI 321 austenitic stainless steel // Archives of Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 2. Issue 106. Pp. 68–77. DOI: 10.5604/01.3001.0014.6974

18. Xie J., Kar A. Laser welding of thin sheet steel with surface oxidation // Welding Research Supplement. 1999. Vol. 78. Issue 10. Pp. 343–348.

19. Artinov A., Karkhin V., Meng X., Bachmann M., Rethmeier M. A General Analytical Solution for Two-Dimensional Columnar Crystal Growth during Laser Beam Welding of Thin Steel Sheets // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. Issue 10. P. 6249. DOI: 10.3390/app13106249

20. Туснин А.Р., Постарнак М.В. Испытания модели мембранного перекрытия многоэтажных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 9. С. 26–35. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.09.26-35. EDN BLXHDI.

Поступила в редакцию 7 июня 2025 г.

Принята в доработанном виде 11 июня 2025 г.

Одобрена для публикации 8 июля 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **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@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Kyvelou P., Huang C., Li J., Gardner L. Residual stresses in steel I-sections strengthened by wire arc additive manufacturing. *Structures*. 2024; 60:105828. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105828

2. Guo X., Kyvelou P., Ye J., Teh L.H., Gardner L. Experimental study of DED-arc additively manufactured steel double-lap shear bolted connections. *Engineering Structures*. 2023; 281:115736. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2023.115736

3. Vatin N., Gubayduln R., Tingaev A. Flange connections with high-strength bolts with technological heredity of bolts. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 7(99). DOI: 10.18720/MCE.99.12. EDN QFVYPO.

4. Protasov K.G., Teplitsky A.V., Kramarev S.Ya., Nikitin M.K. *Metal bridges : tutorial*. Moscow, Transport, 1973; 352. (rus.).

5. Belov V.K., Kalyuta A.A., Rudzey G.F. *Ensuring fatigue life of aircraft structures by technological methods : monograph*. Novosibirsk, NSTU, 2012; 404. EDN RPSAKJ. (rus.).

6. Kozlov I.E. Application of LSTC joints on blind rivets. *Scientific Progress — Creativity of the Young*. 2017; 4:30-32. EDN ZVHCPJ. (rus.).

7. Tushina O.A. Joints of sandwich panels with thin-walled bent purlins with the use of blind rivets. *Industrial and Civil Engineering*. 2013; 3:14-16. EDN OHWQRL. (rus.).

8. Mysak V.V., Tushina O.A., Danilov A.I., Tushin A.R. The features of riveted connections of metal elements. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 3:82-91. EDN RYXTNN. (rus.).

9. Lacki P., Kasza P., Adamus K. Optimization of composite dowels shape in steel-concrete composite floor. *Composite Structures*. 2019; 222:110902. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.110902

10. Kushchev I.E., Petrov M.A. Composite dowels for anchors in low-bearing building envelopes. *Construction Economics*. 2023; 10:132-135. EDN VOGFOQ. (rus.).

11. Gukova M.I., Popelyansky Yu.L., Markov E.S. Evaluation of the strength of connections of metal elements of building structures on dowels. *Industrial Construction*. 1978; 6:23-25. EDN ZIFFQZ. (rus.).

12. Larsson G., Serrano E., Gustafsson P.J., Danielsson H. Dowel design of the shear plate dowel joint. *Engineering Structures*. 2020; 209:110296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110296

13. Eremeev P.G. Thin-sheet membranes — a new type of light metal structures (LMS) coatings. *Installation and Special Works in Construction*. 1992; 7:14-16. EDN YZHETB. (rus.).

14. Eremeev P.G. Thin sheet metal membrane roofs structures: researches, building. *Bulletin of the Scientific Research Center of Construction*. 2017; 3(14):43-57. EDN ZCDGZN. (rus.).

15. Farfel M.I. Steel membrane coatings are an effective type of hanging structures. *Structural Me-*

chanics and Calculation of Structures. 2024; 4(315): 58-67. DOI: 10.37538/0039-2383.2024.4.58.67.EDN ZOTSNM. (rus.).

16. Tusnin A. Experimental research of a membrane roof with the membrane eccentrically fixed on a thin-walled open-profile supporting contour. *Journal of Building Engineering*. 2021; 39:102256. DOI: 10.1016/j.job.2021.102256

17. Shehab A.A., Nawi S.A., Al-Rubaiy A., Hammoudi Z., Hafedh S.A., Abass M.H. et al. CO₂ laser spot welding of thin sheets AISI 321 austenitic stainless steel. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2020; 2(106):68-77. DOI: 10.5604/01.3001.0014.6974

18. Xie J., Kar A. Laser welding of thin sheet steel with surface oxidation. *Welding Research Supplement*. 1999; 78(10):343-348.

19. Artinov A., Karkhin V., Meng X., Bachmann M., Rethmeier M. A General Analytical Solution for Two-Dimensional Columnar Crystal Growth during Laser Beam Welding of Thin Steel Sheets. *Applied Sciences*. 2023; 13(10):6249. DOI: 10.3390/app13106249

20. Tusnin A.R., Postarnak M.V. Testing of the membrane floor slab model of multi-storey buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 9:26-35. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.09.26-35. EDN BLXHDI. (rus.).

Received June 7, 2025.

Adopted in revised form on June 11, 2025.

Approved for publication on July 8, 2025.

BIONOTES: **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.

Управление параметрами расчетной модели пространственной конструкции по результатам натурных испытаний

Олег Александрович Иванов, Владимир Николаевич Сидоров,
Павел Игоревич Новиков

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

АННОТАЦИЯ

Введение. При численном моделировании механических систем близость расчетной модели к поведению объекта в значительной степени определяется адекватностью задаваемых граничных условий. На практике условия закрепления элементов конструкций нередко отличаются от идеализированных предположений, принимаемых в расчетных моделях, что приводит к расхождению расчетных и экспериментальных данных.

Материалы и методы. Рассматривается подход к оптимизации граничных условий конечно-элементной модели на основе эволюционного алгоритма CMA-ES. Объектом исследования стала пространственная рамная конструкция, над которой проведены инструментальные исследования динамических характеристик — собственных частот и свободных колебаний. Сравнение расчетных и экспериментальных частот и форм свободных колебаний осуществлялось с использованием получаемого значения коэффициента согласования форм свободных колебаний и относительной ошибки между значениями вычисляемых собственных частот расчетной модели и их величинами, устанавливаемыми экспериментально. На основе этих метрик формировалась целевая функция задачи оптимизации.

Результаты. Определялись оптимальные значения коэффициентов жесткости опорных связей в нижнем поясе конструкции в направлениях шести степеней свободы. Полученные результаты показали, что применение эволюционного подхода позволяет существенно снизить расхождения между модельными и натурными данными и тем самым повысить точность расчетной модели.

Выводы. Точность конечно-элементного моделирования конструкций можно увеличить за счет согласования модельных и экспериментальных динамических характеристик, используя эволюционные алгоритмы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: расчетная модель, конечно-элементное моделирование, граничные условия, оптимизация, формы собственных колебаний, собственные частоты, динамические характеристики, эволюционный алгоритм, OpenSeesPy, CMA-ES

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Иванов О.А., Сидоров В.Н., Новиков П.И. Управление параметрами расчетной модели пространственной конструкции по результатам натурных испытаний // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 10. С. 1534–1541. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1534-1541

Автор, ответственный за переписку: Олег Александрович Иванов, olivanovpoch@yandex.ru.

Control of parameters of the calculation model of a spatial structure based on the results of full-scale tests

Oleg A. Ivanov, Vladimir N. Sidorov, Pavel I. Novikov

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

ABSTRACT

Introduction. In numerical modelling of mechanical systems, the proximity of the computational model to the actual behaviour of the object is largely determined by the adequacy of the specified boundary conditions. In practice, the support conditions of structural elements often differ from the idealized assumptions adopted in computational models, which leads to discrepancies between calculated and experimental data.

Materials and methods. This study considers an approach to optimizing the boundary conditions of a finite element model using the evolutionary algorithm CMA-ES [1]. The object of investigation was a spatial frame structure, for which experimental studies of dynamic characteristics — natural frequencies and free vibrations — were conducted. The comparison of calculated and experimental frequencies and vibration modes was performed using the modal assurance criterion (MAC) and the relative error between the calculated eigenfrequencies of the model and their experimentally determined values. Based on these metrics, the objective function of the optimization problem was formulated.

Results. The optimization made it possible to determine the stiffness coefficients of the support connections in the lower chord of the structure in six degrees of freedom. The results showed that the application of the evolutionary approach signifi-

cantly reduced discrepancies between model and experimental data, thereby improving the accuracy of the computational model.

Conclusions. The accuracy of finite element modelling of structures can be improved by aligning the model and experimental dynamic characteristics through the use of evolutionary algorithms.

KEYWORDS: computational model, finite element modelling, boundary conditions, optimization, mode shapes, natural frequencies, dynamic characteristics, evolutionary algorithm, OpenSeesPy, CMA-ES

FOR CITATION: Ivanov O.A., Sidorov V.N., Novikov P.I. Control of parameters of the calculation model of a spatial structure based on the results of full-scale tests. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(10):1534-1541. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1534-1541 (rus.).

Corresponding author: Oleg A. Ivanov, olivanovpoch@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Ошибочное задание типов кинематических граничных условий в расчетных моделях является одной из ключевых причин расхождений между расчетными и натурными динамическими характеристиками конструкций. Базовые идеализированные типы назначаемых связей (жесткая заделка, скользящая заделка, неподатливое шарнирное опирание (элементарная связь)) нередко не отражают реального поведения опорных узлов, узловых соединений, взаимодействия с грунтовым основанием, что приводит к существенным расхождениям в проявлениях реальных механических систем и результатов их расчетного анализа [1, 2].

Актуальность задачи корректировки (калибровки) конечно-элементных моделей (КЭ-моделей), по экспериментальным сведениям, возрастает с совершенствованием систем мониторинга и необходимостью повышения достоверности расчетов при обосновании проектных решений, оценке прочности и диагностике повреждений [3]. Современные подходы в моделировании опорных связей (пружины, так называемые zero-length/bushing-элементы¹) позволяют ввести параметры жесткости опор в качестве управляемых величин, однако проблема оптимального выбора этих параметров в своем общем виде остается нерешенной [4].

В научной и инженерной практике для калибровки моделей применяют модальные метрики (собственные частоты, формы свободных колебаний) и критерии их согласования (например, Modal Assurance Criterion — MAC) в составе численного решения задач оптимизации. При этом MAC остается одной из стандартных мер корреляции форм свободных колебаний и широко используется при сопоставлении экспериментальных данных и результатов расчетов [5].

Эволюционные стратегии, в частности CMA-ES (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy), зарекомендовали себя как надежный инструмент в задачах оптимизации с большим числом управляемых параметров и сильной корреляцией между ними; их преимущества — адаптивный выбор ковариации и устойчивость к локальным минимумам — служат

основанием выбора этого алгоритма для подбора граничных условий КЭ-модели [6].

Цель настоящего исследования — разработать и продемонстрировать метод адаптации граничных условий КЭ-модели пространственной рамной конструкции на основе стратегий CMA-ES при решении задачи оптимизации с целевой функцией, объединяющей относительную ошибку в расхождении собственных частот и среднеквадратичную ошибку в сопоставлении форм свободных колебаний. Таким образом, метод ориентирован на уменьшение расхождений между результатами расчетов и натурными динамическими измерениями и на повышение интерпретируемости получаемых поправок к моделируемым условиям опирания. Используемый подход разработан с учетом ряда работ по направленному управлению параметрами КЭ-моделей и оценке применимости эволюционных алгоритмов в задачах структурной идентификации [7–13].

Практическое значение работы заключается в вероятности получить скорректированную расчетную модель, адекватно описывающую особенности реальных опорных связей (включая болтовые и сварные узловые соединения), что повышает точность прогноза динамического поведения конструкций, открывает новые возможности последующей диагностики появляющихся дефектов и снижает риск неверных инженерных решений при проектировании и экспертизе конструкций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — многоярусная пространственная каркасная конструкция, собранная по регулярной ортогональной сетке с шагом 0,4 м. Основной несущий каркас изготовлен из стальных тонкостенных трубчатых профилей квадратного сечения $20 \times 20 \times 1,2$ мм со сварными узловыми соединениями; поэтажные перекрытия выполнены из стальных листов $400 \times 800 \times 2$ мм, которые крепятся к каркасу болтами и накладными пластинами. Общий вид конструкции показан на рис. 1. Каркас опирается на развитые по высоте стальные опорные стойки, жестко закрепленные в сложной по форме опорной балочной системе (рис. 2).

Определение динамических характеристик стеновой конструкции проводилось в 2012 г. в Научно-исследовательской лаборатории инженер-

¹ Minjie Zhu. Библиотека OpenSees на Python — документация API // Oregon State University. 2025.



Рис. 1. Общий вид конструкции

Fig. 1. General view of the structure

ных исследований и мониторинга строительных конструкций зданий и сооружений НИУ МГСУ методом стоячих волн [14–17]. Важная особенность физического стенда заключается в том, что при лабораторных измерениях расположение измерительного оборудования (акустические/сейсмические приемники и регистраторы) изменялось между сеансами — это вносило дополнительную изменчивость в инерционные характеристики перекрытий (масса приборов составляет заметную долю от общей массы стенда). Для выявления динамических характеристик использовался метод стоячих волн с применением автономных сейсмоприемников и регистраторов. Набор измерительных каналов включал несколько датчиков, перемещавшихся



Рис. 2. Опираание конструкции на балочную систему

Fig. 2. Support of the structure on the beam system

по уровням, и одну фиксированную опорную пару вблизи центра верхнего яруса, выбранную в качестве опорной точки. Датчики устанавливали на центральной продольной оси каждого уровня; для улучшения контакта с листами применялись магнитные основания (крепление болтами не использовалось). Собранные спектры амплитуд и фаз ускорений в точках измерений использовались для построения экспериментально полученных частот и форм свободных колебаний исследуемой конструкции.

Численное представление стенда выполнено в программной среде OpenSeesPy. OpenSeesPy представляет собой интерфейс к широко применяемой платформе Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees), ориентированной на моделирование и анализ конструкций при сейсмических и динамических воздействиях. Среда предоставляет средства для построения конечно-элементных моделей, задания материалов и граничных условий, а также проведения статических и динамических расчетов. Использование Python-оболочки значительно упрощает процесс моделирования, позволяя автоматизировать вычислительные процедуры, использовать развитую структуру Python для обработки результатов и интегрировать расчетную модель в более сложные исследовательские сценарии.

Геометрические параметры (в том числе сечение труб, толщины листов) и физико-механические свойства материала конструктивных элементов были заданы в соответствии с описанием характеристик, приведенным в публикации [17]. Узлы КЭ-модели соотнесены с точками установки приборов, чтобы обеспечить прямую сопоставимость экспериментальных и расчетных модальных данных. Для моделирования реальной податливости опирания модели использовалась следующая схема: в каждом опорном узле нижнего пояса создавался дополнительный «фундаментный» узел, жестко фиксируемый по всем шести степеням свободы. Затем между «рабочим» узлом каркаса и «фундаментным» узлом «вставлялся» конечный элемент типа zeroLength с набором одноосных упругих связей с задаваемыми жесткостями $K_x, K_y, K_z, K_{rx}, K_{ry}, K_{rz}$. Такой прием позволяет непосредственно управлять жесткостями опорных связей расчетной модели в нужных степенях свободы DOF без изменения геометрических и физико-механических параметров КЭ в опорной зоне [18].

Из формируемых по результатам эксперимента таблиц со значениями амплитуд и фаз строились комплексные отклики в точках установки измерительных приборов для выделенных резонансных частот:

$$u_i = A_j e^{i\varphi_j},$$

где u_i — комплексный отклик в точке установки измерительного прибора j при выбранной резонансной частоте; A_j — амплитуда отклика в точке j , полученная из экспериментальных данных; φ_j — фаза

отклика в точке j , также взятая из экспериментальных данных; $e^{i\varphi_j}$ — комплексный множитель, представляющий фазовую часть в виде числа на комплексной плоскости (согласно формуле Эйлера: $e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \cdot \sin \varphi$).

Экспериментальная модальная форма для данной частоты формировалась как вектор комплексных компонент по узлам. Для сравнения с расчетной формой использовалась стандартная мера корреляции мод МАС, дающая значение в интервале от 0 до 1 (1 — полное совпадение) [7].

Параметризация коэффициентов жесткости zeroLength-связей велась по каждой из шести степеней свободы двенадцати опорных узлов расчетной модели. С целью уменьшения количества параметров и ускорения работы алгоритма было принято допущение, что коэффициенты жесткости во всех опорных узлах равны в разных направлениях, при этом узлы крепления нижних стержневых элементов к опорной балочной системе одинаковые. В качестве целевой функции применялось сочетание двух компонентов: относительной ошибки в значениях собственных частот (MAPE — mean absolute percentage error) и меры расхождения по формам свободных колебаний, взятой как RMSE (root mean square error) меры МАС, вычисляемой методом наименьших квадратов. Таким образом, целевая функция:

$$J = MAPE(f) + RMSE(1 - MAC),$$

где J — итоговая комбинированная метрика, которую минимизирует эволюционный алгоритм;

$$MAPE(f) = \frac{1}{N} \sum \frac{|f^{FE} - f^{EXP}|}{f^{EXP}}; \quad RMSE(1 - MAC) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (1 - MAC_{ii})^2}; \quad f^{FE} — \text{первые } N \text{ собственных частот КЭ-модели; } f^{EXP} — \text{первые } N \text{ собственных частот, полученных экспериментальным путем; } MAC_{ii} — \text{диагональные элементы МАС-матрицы.}$$

Такой подход позволяет одновременно минимизировать расхождения в частотах и нарушение форм.

Для поиска оптимальных значений коэффициентов жесткости расчетной модели использовался эволюционный алгоритм СМА-ES. Эволюционные алгоритмы — стохастические методы оптимизации, вдохновленные механизмами естественного отбора; они работают с популяцией кандидатных решений, применяют операции мутации/рекомбинации и отбор по приспособленности, что делает их пригодными для негладких, многомодальных и дискретно-зависимых целевых функций [19]. СМА-ES — специализированная стратегия для непрерывных задач, где на каждой итерации кандидатные решения задачи оптимизации порождаются из многомерного нормального распределения; ключевая идея — адаптивное обновление ковариацион-

ной матрицы этого распределения, что дает возможность алгоритму «учиться» структурам корреляций между параметрами и эффективно направлять поиск в пространстве решений [6].

Преимущества примененного эволюционного алгоритма — автоматическая адаптация масштаба поиска и ковариации, хорошая устойчивость к шуму и локальным минимумам, способность работать без градиентов и с плотной корреляцией параметров, что важно при подборе множественных жесткостей. Недостатки — значительная вычислительная нагрузка при большом числе параметров из-за издержек на оценку популяции, требовательность к числу вызовов целевой функции и потенциальная необходимость ограничения размерности параметризации — группировка параметров по симметрии или типам [5, 6].

Алгоритм реализован на языке Python с использованием библиотеки *сма*. Валидация полученных корректировок включала сравнение спектров частот, получаемых на диагонали матрицы МАС.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Построенная конечно-элементная модель пространственного каркаса показала удовлетворительное совпадение с натурными данными лишь при введении в расчет податливости опор. Жесткое закрепление нижних опорных узлов по всем направлениям приводило к систематическому завышению собственных частот и искажению форм колебаний, что подтверждает необходимость корректировки граничных условий. Значения частот при жестком закреплении по всем степеням свободы приведены в табл. 1, соответствующая матрица МАС показана на рис. 3. Элементы главной диагонали матрицы представляют собой коэффициенты корреляции между экспериментально полученными формами собственных колебаний и соответствующими формами, вычисленными в расчетной модели. Значение целевой функции при таком закреплении равно 8,436.

Для оптимизации параметров опорных связей использован алгоритм СМА-ES. В качестве целевой функции применялось комбинированное выражение, учитывающее относительное отклонение значений собственных частот, полученных в расчетах и экспериментально, MAPE и меру расхождения модальных форм RMSE на основе формирования и анализа матрицы МАС. Оптимизация проводилась в пространстве шести параметров жесткости в направлениях всех степеней свободы опорных узлов при размере популяции 12.

В результате 45 итераций (540 расчетов модели) удалось оптимизировать коэффициенты жесткости, при которых обеспечивалось значение целевой функции 0,508, что соответствует существенному снижению расхождения по сравнению с исходным вариантом. Собственные частоты и МАС-матрица форм обновленной модели отображены в табл. 2 и на рис. 4.

Табл. 1. Сравнение частот свободных колебаний КЭ-модели при жестком закреплении опорных стоек по всем направлениям и частот, измеренных в лабораторном эксперименте

Table 1. Comparison of natural frequencies of the finite element model with rigid fixation of support columns in all directions and frequencies measured in the laboratory experiment

FEM частота, Гц FEM frequency, Hz	Натурная частота, Гц Experimental frequency, Hz	Абсолютная относительная ошибка, % Absolute percentage error, %
6,431	4,639	38,6
6,845	5,188	31,9
9,096	6,897	31,9
20,072	15,625	28,5
20,204	17,273	17,0
21,320	20,142	5,9

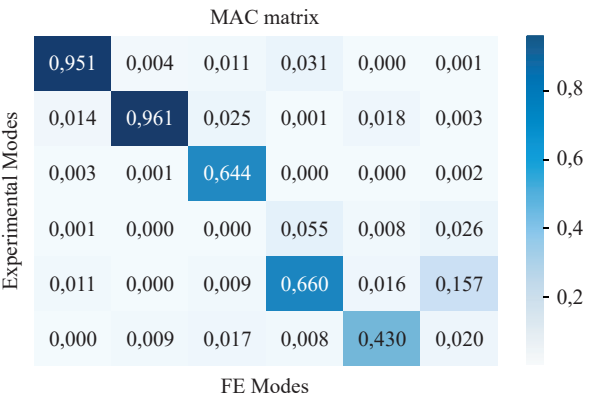


Рис. 3. MAC-матрица форм свободных колебаний при жестком закреплении по всем направлениям

Fig. 3. MAC matrix of mode shapes under rigid fixation in all directions

Относительная ошибка в значениях собственных частот снизилась с 5,9–38,6 % до 0,4–4,6 %. По MAC-матрице видно, что формы на 4-й и 5-й частотах, полученные в расчетной модели, стали лучше описывать свободные колебания реальной конструкции.

Полученные результаты подтверждают рабочую гипотезу о том, что адаптация граничных условий с использованием эволюционного алгоритма для рассматриваемой конструкции позволяет существенно повысить соответствие численных моделей динамики конструкций поведению их оригиналов. Особенно важно отметить, что учет податливости опорных узлов не только улучшает совпадение ча-

Табл. 2. Сравнение частот свободных колебаний КЭ-модели после обновления жесткостных связей опорных стоек и частот, измеренных в лабораторном эксперименте

Table 2. Comparison of natural frequencies of the finite element model after updating the stiffness connections of the support columns and frequencies measured in the laboratory experiment

FEM частота, Гц FEM frequency, Hz	Натурная частота, Гц Experimental frequency, Hz	Абсолютная относительная ошибка, % Absolute percentage error, %
4,613	4,639	0,6
5,155	5,188	0,6
6,822	6,897	1,1
16,351	15,625	4,6
17,630	17,273	2,1
20,059	20,142	0,4

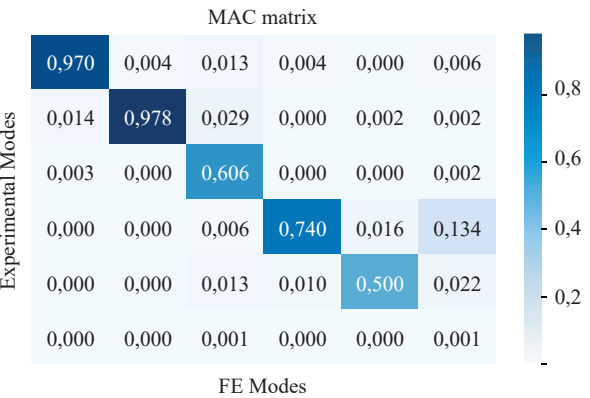


Рис. 4. MAC-матрица форм свободных колебаний обновленной модели

Fig. 4. MAC matrix of mode shapes of the updated model

стот, но и обеспечивает лучшее воспроизведение форм колебаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что точность конечно-элементного моделирования динамических характеристик конструкций зависит от корректности задания кинематических граничных условий в ее расчетной модели. Использование эволюционного алгоритма СМА-ES для оптимизации параметров податливости общих жесткостных характеристик опорных связей позволило существенно сократить ошибку в значениях собственных частот колебаний конструкции, полученных в расчетах по сравнению с результатами экспери-

мента, а также увеличить коэффициенты корреляции форм свободных колебаний. Предложенный подход продемонстрировал перспективность его применения

при калибровке КЭ-моделей, обеспечивая более точное согласование результатов расчетов и динамических характеристик, полученных экспериментально.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Nomura M., Shibata M. Cmaes: A Simple yet Practical Python Library for CMA-ES // arXiv: 2402.01373. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2402.01373
2. Park Y.S., Kim S., Kim N., Lee J.J. Finite element model updating considering boundary conditions using neural networks // Engineering Structures. 2017. Vol. 150. Pp. 511–519. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.07.032
3. Сидоров В.Н. Алгоритм корректировки вычислительной расчетной модели сооружения при его мониторинге // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2013. Т. 9. № 2. С. 118–123. EDN RDQZGR.
4. Zhou S., Song W. Environmental-effects-embedded model updating method considering environmental impacts // Structural Control and Health Monitoring. 2017. Vol. 25. Issue 3. P. e2116. DOI: 10.1002/stc.2116
5. Allemang R. The Modal Assurance Criterion (MAC): Twenty Years of Use and Abuse // Journal of Sound and Vibration. 2003. Vol. 37. Issue 8.
6. Hansen N. The CMA Evolution Strategy : a Tutorial // arXiv:1604.00772. 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1604.00772
7. Alkayem N.F., Cao M., Zhang Y., Bayat M., Su Z. Structural damage detection using finite element model updating with evolutionary algorithms : a survey // Neural Computing and Applications. 2018. Vol. 30. Issue 2. Pp. 389–411. DOI: 10.1007/s00521-017-3284-1
8. Ghahremani B., Bitaraf M., Rahami H. A fast-convergent approach for damage assessment using CMA-ES optimization algorithm and modal parameters // Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2020. Vol. 10. Issue 3. Pp. 497–511. DOI: 10.1007/s13349-020-00397-1
9. Chen B., Starman B., Halilović M., Berglund L.A., Coppieters S. Finite Element Model Updating for Material Model Calibration : a Review and Guide to Practice // Archives of Computational Methods in Engineering. 2024. Vol. 32. Issue 4. Pp. 2035–2112. DOI: 10.1007/s11831-024-10200-9
10. Chen Q., Zhou S., Xiao Y., Chen L., Zhou Y., Zhang L. Modal test and finite element updating of sprayer boom truss // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-024-73640-0
11. Li D., Zhou J., He X. A unified approach for time-domain and frequency-domain finite element model updating // Mechanical Systems and Signal Processing. 2025. Vol. 227. P. 112361. DOI: 10.1016/j.ymssp.2025.112361
12. Chen X., Zhang D., Beer M., Aadil M. Improved efficiency and accuracy in Bayesian structural model updating via DREAMCMASZ sampling and Kriging surrogates // Structures. 2025. Vol. 80. P. 109856. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.109856
13. Liu H., Qin L., Zhou Z. Knowledge-Based Perturbation LaF-CMA-ES for Multimodal Optimization // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. Issue 19. P. 9133. DOI: 10.3390/app14199133
14. Коргин А.В., Ермаков В.А. Автоматизированная актуализация МКЭ-модели сооружения в ходе мониторинга // Механизация строительства. 2011. № 7 (805). С. 16–17. EDN NXBFFR.
15. Белостоцкий А.М., Каличава Д.К., Нагибович А.И., Петряшев Н.О., Петряшев С.О. Адаптируемые конечноэлементные модели в основе динамического мониторинга несущих конструкций высотных зданий. Часть 2: Верификация методики на стендовых моделях // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2012. Т. 8. № 4. С. 28–42. EDN PZEXJN.
16. Каличава Д.К. Адаптивные динамические конечноэлементные модели в основе мониторинга несущих конструкций высотных зданий : дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 149 с. EDN SUOQDX.
17. Новиков П.И. Численно-аналитическая методика идентификации параметров жесткости пространственных конструкций на основе минимизации различия расчетных (конечноэлементных) и натурных динамических характеристик // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 3. С. 64–71. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-3-64-71. EDN LFCLNA.
18. Friswell M.I., Mottershead J.E. Finite Element Model Updating in Structural Dynamics // Solid Mechanics and its Applications. 1995. DOI: 10.1007/978-94-015-8508-8
19. Alkayem N.F., Cao M., Zhang Y., Bayat M., Su Z. Structural damage detection using finite element model updating with evolutionary algorithms : a survey // Neural Computing and Applications. 2018. Vol. 30. Issue 2. Pp. 389–411. DOI: 10.1007/s00521-017-3284-1

Поступила в редакцию 15 сентября 2025 г.

Принята в доработанном виде 28 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 9 октября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Олег Александрович Иванов — аспирант кафедры информатики и прикладной математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; olivanovpoch@yandex.ru;

Владимир Николаевич Сидоров — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики и прикладной математики, академик РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; kanz@mgsu.ru, sidorov.vladimir@gmail.com;

Павел Игоревич Новиков — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры информатики и прикладной математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; kanz@mgsu.ru, novikov.mgsu@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Nomura M., Shibata M. Cmaes: A Simple yet Practical Python Library for CMA-ES. *ArXiv:2402.01373*. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2402.01373
2. Park Y.S., Kim S., Kim N., Lee J.J. Finite element model updating considering boundary conditions using neural networks. *Engineering Structures*. 2017; 150:511-519. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.07.032
3. Sidorov V.N. Structure numerical model updating algorithm on the results of monitoring. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2013; 9(2):118-123. EDN RDQZGR. (rus.).
4. Zhou S., Song W. Environmental-effects-embedded model updating method considering environmental impacts. *Structural Control and Health Monitoring*. 2017; 25(3):e2116. DOI: 10.1002/stc.2116
5. Allemang R. The Modal Assurance Criterion (MAC): Twenty Years of Use and Abuse. *Journal of Sound and Vibration*. 2003; 37(8).
6. Hansen N. The CMA Evolution Strategy : a Tutorial. *ArXiv:1604.00772*. 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1604.00772
7. Alkayem N.F., Cao M., Zhang Y., Bayat M., Su Z. Structural damage detection using finite element model updating with evolutionary algorithms : a survey. *Neural Computing and Applications*. 2018; 30(2): 389-411. DOI: 10.1007/s00521-017-3284-1
8. Ghahremani B., Bitaraf M., Rahami H. A fast-convergent approach for damage assessment using CMA-ES optimization algorithm and modal parameters. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2020; 10(3): 497-511. DOI: 10.1007/s13349-020-00397-1
9. Chen B., Starman B., Halilović M., Berglund L.A., Coppieters S. Finite Element Model Updating for Material Model Calibration : a Review and Guide to Practice. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2024; 32(4):2035-2112. 10.1007/s11831-024-10200-9
10. Chen Q., Zhou S., Xiao Y., Chen L., Zhou Y., Zhang L. Modal test and finite element updating of sprayer boom truss. *Scientific Reports*. 2024; 14(1). DOI: 10.1038/s41598-024-73640-0
11. Li D., Zhou J., He X. A unified approach for time-domain and frequency-domain finite element model updating. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2025; 227:112361. DOI: 10.1016/j.ymssp.2025.112361
12. Chen X., Zhang D., Beer M., Aadil M. Improved efficiency and accuracy in Bayesian structural model updating via DREAMCMAZS sampling and Kriging surrogates. *Structures*. 2025; 80:109856. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.109856
13. Liu H., Qin L., Zhou Z. Knowledge-Based Perturbation LaF-CMA-ES for Multimodal Optimization. *Applied Sciences*. 2024; 14(19):9133. DOI: 10.3390/app14199133
14. Korgin A.V., Ermakov V.A. Automated update of the FEM-model of the facilities in the monitoring. *Mechanization of Construction*. 2011; 7(805):16-17. EDN NXBFFR. (rus.).
15. Belostotsky A.M., Kalichava D.K., Nagibovich A.I., Petryashev N.O., Petryashev S.O. Adaptive finite element models as the base of dynamic monitoring of tall buildings. Part 2. Verification procedures for experimental models. *International Journal for Computational*

Civil and Structural Engineering. 2012; 8(4):28-42. EDN PZEXJN. (rus.).

16. Kalichava D.K. *Adaptive dynamic finite element models for monitoring load-bearing structures of high-rise buildings : dissertation ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2012; 149. EDN SUOQDX. (rus.).

17. Novikov P.I. Numerical analysis technique for stiffness parameters identification of spatial structures by minimizing the difference between the calculated (finite element) and natural dynamic characteristics. *Intelligent Systems in Production*. 2020; 18(3):64-71.

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-3-64-71. EDN LFLCLNA. (rus.).

18. Friswell M.I., Mottershead J.E. *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics. Solid Mechanics and its Applications*. 1995. DOI: 10.1007/978-94-015-8508-8

19. Alkayem N.F., Cao M., Zhang Y., Bayat M., Su Z. Structural damage detection using finite element model updating with evolutionary algorithms : a survey. *Neural Computing and Applications*. 2018; 30(2):389-411. DOI: 10.1007/s00521-017-3284-1

Received September 15, 2025.

Adopted in revised form on September 28, 2025.

Approved for publication on October 9, 2025.

Bionotes: **Oleg A. Ivanov** — postgraduate student of the Department of Computer Science and Applied Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; olivanovpoch@yandex.ru;

Vladimir N. Sidorov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Science and Applied Mathematics, Academician of RAASN; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; kanz@mgsu.ru, sidorov.vladimir@gmail.com;

Pavel I. Novikov — Candidate of Technical Sciences, senior lecturer of the Department of Computer Science and Applied Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; kanz@mgsu.ru, novikov.mgsu@gmail.com.

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

The authors declare no conflict of interest.

Трещинообразование узлов сопряжения стержневых элементов из тяжелого бетона при статическом и статико-динамическом нагружении

Павел Анатольевич Кореньков¹, Наталия Витальевна Федорова¹,
Татьяна Александровна Ильющенко²

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

² Курский государственный университет (КГУ); г. Курск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В связи с постоянным ув6-166-16белчением на здания и сооружения запроектных влияний техногенного и природного характера актуальным направлением повышения их безопасности является проведение экспериментальных исследований строительных конструкций, направленных на защиту от таких воздействий. Важнейшим элементом рассматриваемых конструктивных систем служат соединения их элементов, которые должны обеспечивать безопасность каркасов при различных, включая особые, воздействиях. Это связано с необходимостью более полной оценки их трещиностойкости при особых воздействиях.

Материалы и методы. Экспериментальное исследование проводилось на специально разработанной установке, позволяющей моделировать напряженно-деформированное состояние ригеля, как в эксплуатационной стадии, так и при аварийном влиянии. При осуществлении эксперимента на различных этапах загрузки проектной нагрузкой и после аварийного воздействия измерены деформации 1542-1552 бетона и арматуры, вертикальные и горизонтальные перемещения элементов узла, зафиксирована схема образования, развития и раскрытия трещин.

Результаты. Выполнено исследование узлов сопряжения стержневых элементов из тяжелого бетона при статическом и статико-динамическом нагружении. Получены результаты экспериментальных исследований трещиностойкости, развития и раскрытия трещин, а также картины трещинообразования узлов сопряжения стержневых элементов при статическом и статико-динамическом нагружении.

Выводы. Отмечен схожий характер трещинообразования в узлах сопряжения при статическом и статико-динамическом нагружении в ригелях и колоннах. Отличным является расположение нормальных трещин в колоннах, что объясняется многоступенчатостью и временным интервалом приложения статической нагрузки.

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

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кореньков П.А., Федорова Н.В., Ильющенко Т.А. Трещинообразование узлов сопряжения стержневых элементов из тяжелого бетона при статическом и статико-динамическом нагружении // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 10. С. 1542–1552. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1542-1552

Автор, ответственный за переписку: Павел Анатольевич Кореньков, kra_gbk@mail.ru.

Crack formation in heavy concrete reinforcing bar connection joints under static and static-dynamic loading of reinforced concrete structures

Pavel A. Korenkov¹, Natalia V. Fedorova¹, Tatiana A. Iliushchenko²

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

² Kursk State University (KSU); Kursk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Due to the constant increase in design-exceeding technogenic and natural impacts on buildings and structures, an important direction for improving their safety is to conduct experimental research on structural elements designed to protect against such impacts. The most critical components of these structural systems are the connection joints between their elements, which must ensure the safety of the frames under various, including extreme, conditions. This necessitates a more comprehensive assessment of their crack resistance under special impacts.

Materials and methods. The experimental study was conducted on a specially designed test setup capable of simulating the stress-strain state of a beam both under service conditions and under emergency impacts. During the test, at various stages of loading with the design load and after the emergency impact, the following parameters were measured: strains in the concrete and reinforcement, vertical and horizontal displacements of the joint elements. The pattern of crack formation, propagation, and width was also recorded.

Results. A study was conducted on the connection joints of heavy concrete bar elements under static and static-dynamic loading. The results of experimental investigations into crack resistance, as well as the development, width, and patterns of crack formation in the connection nodes under these loading conditions, are presented.

Conclusions. The study results indicated a similar pattern of crack formation in the connection joints of beams and columns under both static and static-dynamic loading. A difference was observed in the location of flexural cracks in the columns, which is explained by the multi-stage nature and the time interval of the static load application.

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

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

FOR CITATION: Korenkov P.A., Fedorova N.V., Iliushchenko T.A. Crack formation in heavy concrete reinforcing bar connection joints under static and static-dynamic loading of reinforced concrete structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(10):1542-1552. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1542-1552 (rus.).

Corresponding author: Pavel A. Korenkov, kpa_gbk@mail.

ВВЕДЕНИЕ

Решению задач, сопряженных с проблемой обеспечения живучести несущих систем зданий и сооружений в особых расчетных ситуациях, в последние годы уделяется все большее внимание как в отечественных [1–3], так и зарубежных работах [4–6]. Как показывает ряд последних исследований [7], понятие «живучесть» открывает новое отдельное направление в области механической безопасности зданий и сооружений, связанное, в первую очередь, с развитием физических моделей механической безопасности для сооружений из различных материалов [8]. Поэтому необходимы исследования по решению задач указанной проблемы, ориентированные на совершенствование и создание современных способов защиты каркасов различных зданий от особых воздействий. По результатам этих и других исследований предложены различные способы защиты железобетонных (ЖБ) каркасов зданий от прогрессирующего обрушения при особых воздействиях. В частности, известны предложения по увеличению сечений конструктивных элементов зданий [9, 10], усилению элементов ЖБ конструктивных систем установкой косвенной арматуры [11], предварительно напряженной арматуры в ригелях [12], использование высокопрочного железобетона [13].

Что касается изучения элементов конструкций из высокопрочного ЖБ, то можно отметить работы [14, 15], в которых рассматриваются вопросы обеспечения конструктивной безопасности, создания новых расчетных моделей из такого материала. В трудах [16, 17] представлены расчетные модели теории ЖБ при различных напряженных состояниях и режимах длительного сопротивления. Следует выделить и ряд зарубежных исследований, посвященных сопротивлению конструкций прогрессирующему обрушению из высокопрочного ЖБ [18–20].

Важнейшим элементом рассматриваемых конструктивных систем являются соединения их элемен-

тов, которые должны обеспечивать безопасность каркасов при различных, включая особые, воздействиях. Известны отечественные публикации по изучению узлов сопряжения конструктивных элементов ЖБ каркасов зданий при запроектных воздействиях. Так, проводились исследования работы узлового сопряжения ригелей и колонн в сборно-монолитном ЖБ каркасе с использованием программных комплексов [21] и экспериментальные исследования [22, 23], в которых рассматривались узлы сопряжения ЖБ каркасов многоэтажных зданий при запроектных и трехкратных динамических воздействиях. Большая часть зарубежных исследований посвящена анализу сборных ЖБ узлов сопряжения ригелей и колонн [24, 25]. Можно отметить численное изучение механизма разрушения узла сопряжения ригеля и колонны при динамическом воздействии на ригель [26].

Среди исследований соединения конструктивных элементов из высокопрочного ЖБ имеются отдельные зарубежные работы по экспериментально-теоретическому изучению узлов сопряжений колонны из высокопрочного ЖБ и стальной балки в условиях сейсмики [27], стальной колонны круглого сечения и балки из высокопрочного ЖБ [28], сейсмостойкости узла соединения балка – колонна из высокопрочного фибробетона [29].

В то же время, как показали эти труды и анализ [21], изучение узлов сопряжения конструктивных элементов из высокопрочного ЖБ при запроектных воздействиях даст возможность наибольшим образом раскрыть особенности сопротивления всей конструктивной системы. В связи с этим в настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований узлов сопряжения стержневых элементов из тяжелого бетона при статическом и статико-динамическом нагружении.

Рассмотрены и решены следующие задачи: получены результаты экспериментальных исследований трещиностойкости, развития и раскрытия тре-

щин, а также картины трещинообразования узлов сопряжения стержневых элементов при статическом и статико-динамическом нагружении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На основании разработанной ранее методики проведения экспериментальных исследований узлов сопряжения¹ выполнена качественная и количественная оценка трещинообразования узлов сопряжения

¹ Патент RU № 2841155 С1, МПК G01М 99/00. Способ экспериментального определения динамических догрузений в несущих конструктивных элементах монолитных железобетонных каркасов / В.И. Колчунов, П.А. Кореньков, И.М. Безгодов, С.Р. Меликсетян; заявитель Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; заявл. от 22.11.2024; опубл. 03.06.2025. EDN DPABYG.

стержневых элементов из тяжелого бетона при статическом и статико-динамическом нагружении. На рис. 1 приведена схема испытаний узла, позволяющая моделировать напряженно-деформированное состояние (НДС) ригеля, как в эксплуатационной стадии, так и при аварийных воздействиях с учетом того, что в процессе нагружения в ригелях рамных каркасов зданий над местом начального локального разрушения могут последовательно быть реализованы следующие стадии НДС: изгибаная до достижения текучести в стержнях продольной растянутой арматуры; арочная до достижения прогибом величины, равной высоте сечения ригеля, а применительно к испытаниям узлов — до разрушения бетона сжатой зоны; цепная до момента обрыва наиболее растянутой арматуры. Это достигается посредством ограничения смещения торцов узла по горизонтали с одновременной возможностью поворота в плоско-

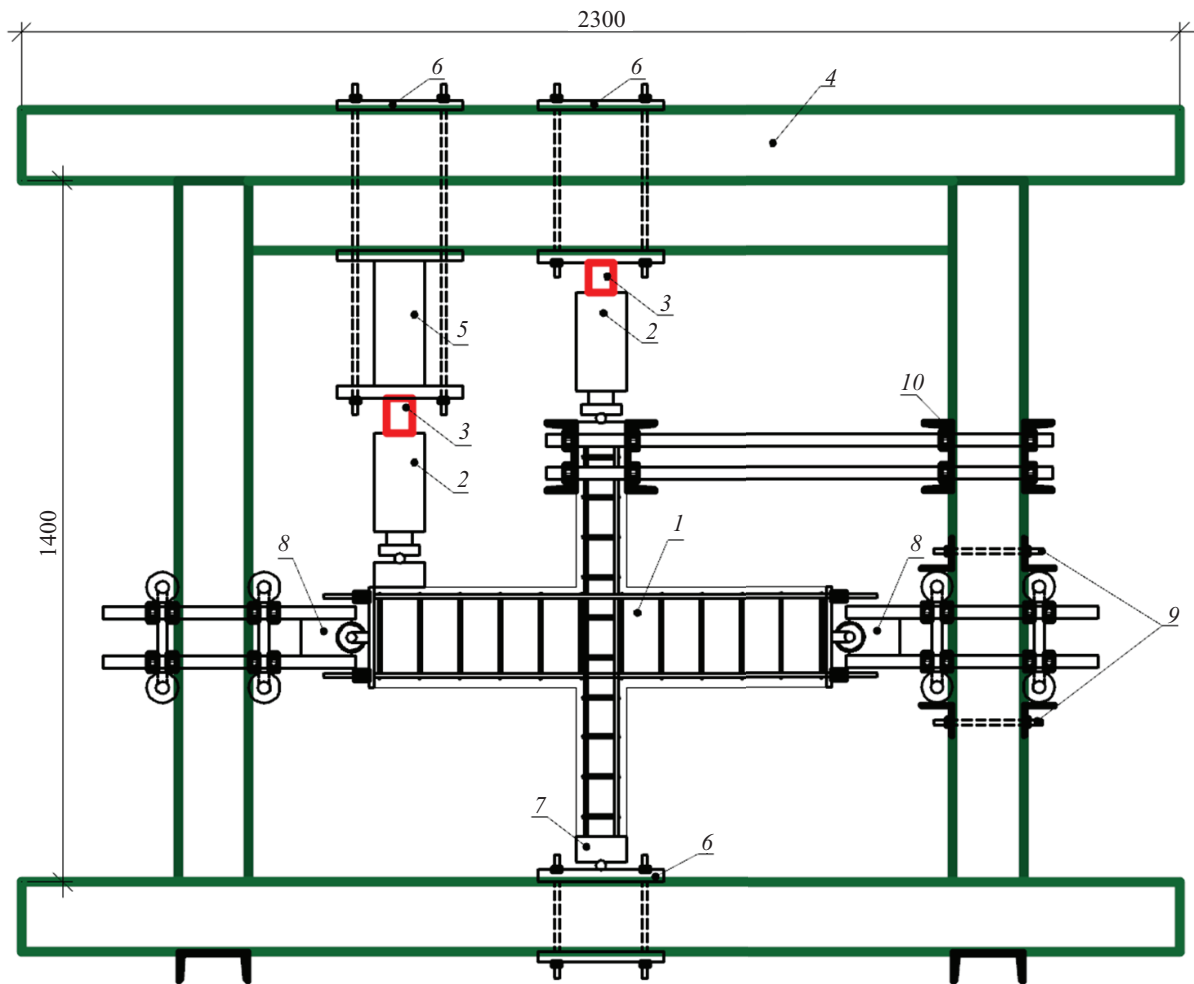


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки: 1 — опытная конструкция; 2 — гидравлический домкрат; 3 — датчик силы; 4 — силовая рама; 5 — упор гидравлического домкрата; 6 — распределительные пластины; 7 — металлические пластины; 8 — устройство двусторонних линейных связей; 9 — ограничитель вертикальных перемещений; 10 — ограничитель горизонтальных перемещений

Fig. 1. General view of the experimental setup: 1 — experimental structure; 2 — hydraulic jack; 3 — force sensor; 4 — load frame; 5 — hydraulic jack stop; 6 — distribution plates; 7 — metal plates; 8 — bilateral linear linkage device; 9 — vertical displacement limiter; 10 — horizontal displacement limiter

Значения нагрузок и изгибающих моментов на ступенях при статическом нагружении

Values of loads and bending moments on steps under static loading

Номер ступени Step number	Нагрузка P , кН Load P , kN	Момент M , кНм Moment M , kNm	Номер ступени Step number	Нагрузка P , кН Load P , kN	Момент M , кНм Moment M , kNm
I	2,84	0,99	VI	15,74	5,51
II	5,53	1,94	VII	18,53	6,49
III	7,87	2,75	VIII	21,27	7,44
IV	10,81	3,78	IX	23,71	8,30
V	13,2	4,62	X	26,4	9,24

сти изгиба с перемещением по вертикали с помощью опор качения, закрепленных на раме.

В процессе испытаний на различных этапах загрузки проектной нагрузкой и после аварийного воздействия были измерены деформации бетона и арматуры, вертикальные и горизонтальные перемещения элементов узла, зафиксирована схема образования, развития и раскрытия трещин. Величина нагрузки P на ступенях представлена в таблице.

При приложении проектной нагрузки в виде сосредоточенных сил (по две силы в каждом пролете ригеля) общая картина трещинообразования соответствовала характеру НДС в элементах рамы как первой, так и второй серии.

В ЖБ элементах в зависимости от внешних силовых воздействий принято различать трещины трех типов: первый — нормальные к продольной оси элемента, пересекающие продольную и поперечную арматуру; образуются на участках, где момент трещинообразования превышает действующий, а перерезывающая сила не превышает значений, при которых происходит трещинообразование в наклонных сечениях. Второй соответствует наклонным трещинами в зоне совместного действия изгибающего момента и перерезывающей силы, значения которых превышают момент трещинообразования как нормальных, так и наклонных трещин. В третьем значения изгибающего момента не превышают момента трещинообразования, а величина поперечной силы выше, чем сопротивление раскрытию наклонной трещины в бетоне. Однако озвученная классификация касается элементов, испытывающих в основном изгиб. В рассматриваемых узловых соединениях имеет место также влияние продольной силы в колонне, что в значительной степени усложняет напряженное состояние.

Первые трещины в образце, загружаемом статической силой, образовались на III ступени от действия изгибающего момента, превышающего $M_{crc,beam} = 2,52$ кН·м, и развиваясь вдоль грани колонны на величину $h_{crc} = 97$ мм на V ступени, после чего возникает вторая нормальная трещина на расстоянии $l_{crc1} = 75$ мм от грани колонны и доходит до оси арматуры, далее на VI ступени ее направление меняется и ее развитие продолжается под углом 36° к продольной оси ригеля, на этой же ступени длина первой трещины увеличива-

ется до $h_{crc} = 124$ мм, а ширина раскрытия составляет $a_{crc} = 0,2$ мм (рис. 2).

На VII ступени образовалась третья нормальная трещина на расстоянии от второй $l_{crc2} = 66$ мм на глубину защитного слоя, при этом величина смещения $\Delta l_{crc1} = 2,66$ мм, а $\Delta l_{crc2} = 4,85$ мм относительно первой трещины, в то же время высота первой трещины увеличилась на максимальную величину $h_{crc} = 138$ мм, что соответствует $a_{crc} = 0,3$ мм, после чего увеличивалась только ширина ее раскрытия на IX и X ступенях нагружения с максимальной $a_{crc} = 0,4$ мм. Также на VII ступени образовались нормальные трещины на глубину $h_{crc4} = h_{crc5} = 18$ мм в колонне шириной $a_{crc} = 0,01$ мм, первая по границе ригеля, вторая на расстоянии $l_{crc} = 28$ мм (трещины 4 и 5 соответственно), что свидетельствует о превышении момента трещинообразования $M_{crc,col} = 0,76$ кН·м в колонне при действующей продольной силе $N = 12,5$ кН.

На VIII ступени произошло увеличение глубины трещины $h_{crc2} = 105$ мм под тем же углом 36° и увеличение глубины трещины $h_{crc3} = 93$ мм практически по нормали к продольной оси ригеля. Также на данной ступени от совместного действия сжимающих и растягивающих напряжений образовалась наклонная трещина № 6 в узловой зоне ригеля и колонны шириной $a_{crc} = 0,1$ мм.

На IX ступени произошло приращение до максимального значения глубины приращения трещин 2 и 3 $h_{crc2} = h_{crc3} = 119$ мм, при этом угол наклона трещины № 2 не изменился, а трещины № 3 с практически вертикального изменился до 66° к нормали сечения, что объясняется направлениями главных растягивающих напряжений. Также отмечается образование двух новых трещин в колонне под ригелем глубиной от $h_{crc7} = 22$ мм до $h_{crc7} = 50$ мм с незначительной шириной раскрытия $a_{crc7} = 0,01$ мм и $a_{crc7} = 0,05$ мм. На этой ступени продолжилось и развитие наклонной трещины внутри узла к левой нижней грани.

На последней X ступени, помимо развития всех описанных трещин, к внутреннему левому углу соединения ригеля и колонны также трещина № 3 получила развитие в сторону поверхности ригеля под углом 36° к нормали сечения, кроме этого, образовались две новые: одна (№ 9) сжатия вдоль арматуры колонны глубиной $h_{crc9} = 130$ мм и шириной раскрытия $a_{crc9} = 0,30$ мм, и вторая (№ 10) параллельно уже

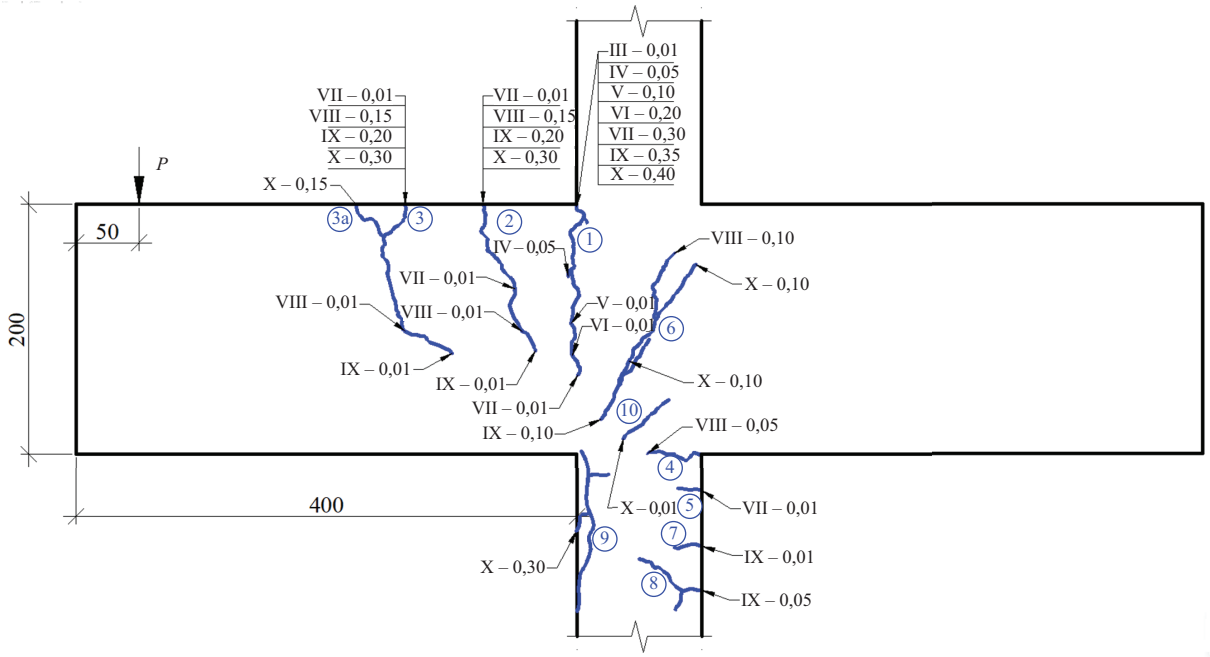


Рис. 2. Схема образования и раскрытия трещин всех типов при статическом нагружении
Fig. 2. Scheme of formation and opening of cracks of all types under static loading

имеющейся трещине № 6 на расстоянии $l_{cr} = 31$ мм от значительной величины сдвигающих усилий. Значение нагрузки и действующего изгибающего момента на каждой ступени приведено в таблице. Схема приложения нагрузки, образования и раскрытия трещин всех типов при проектной на-

грузке показана на рис. 2 для опытного образца, загруженного статической нагрузкой. Общий вид образца после испытаний представлен на рис. 3. На следующем этапе экспериментальных исследований был испытан аналогичный узел, но нагружение осуществлялось с нуля до уровня, соот-

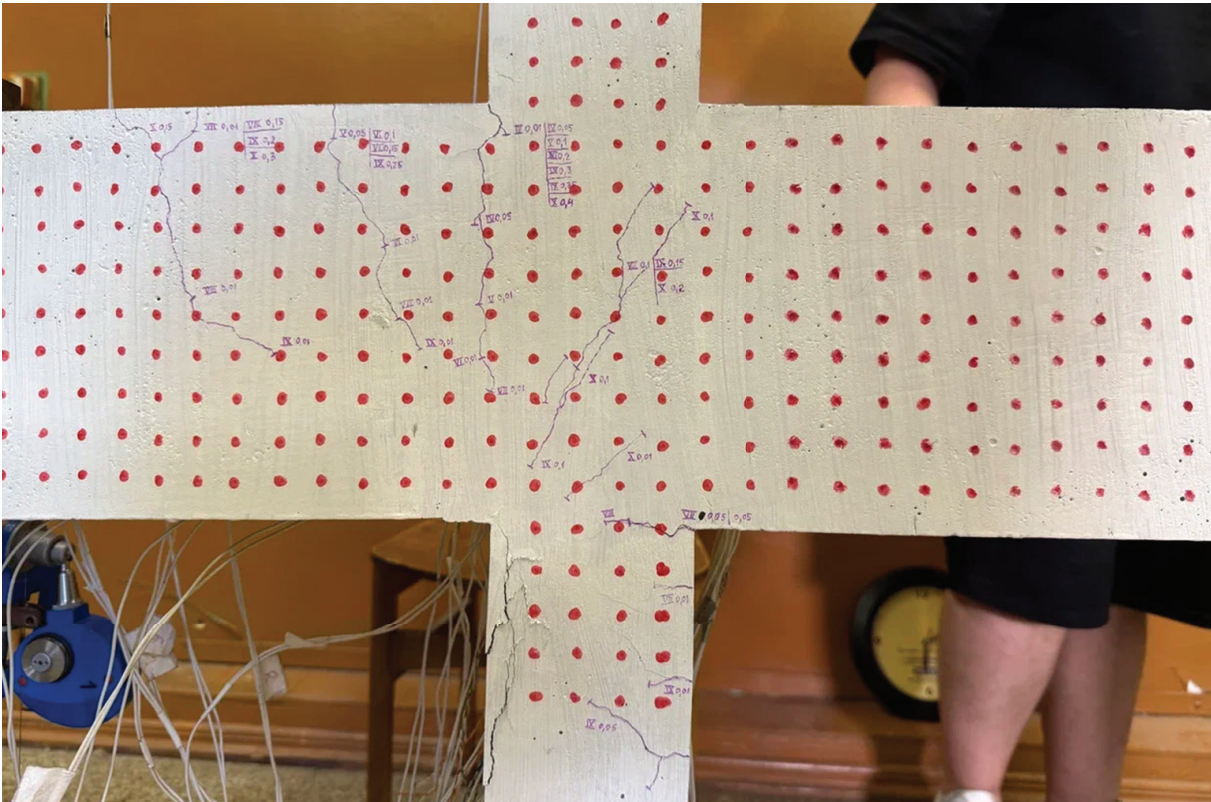


Рис. 3. Общий вид образования трещин при испытании статической нагрузкой
Fig. 3. General appearance of crack formation during static load testing

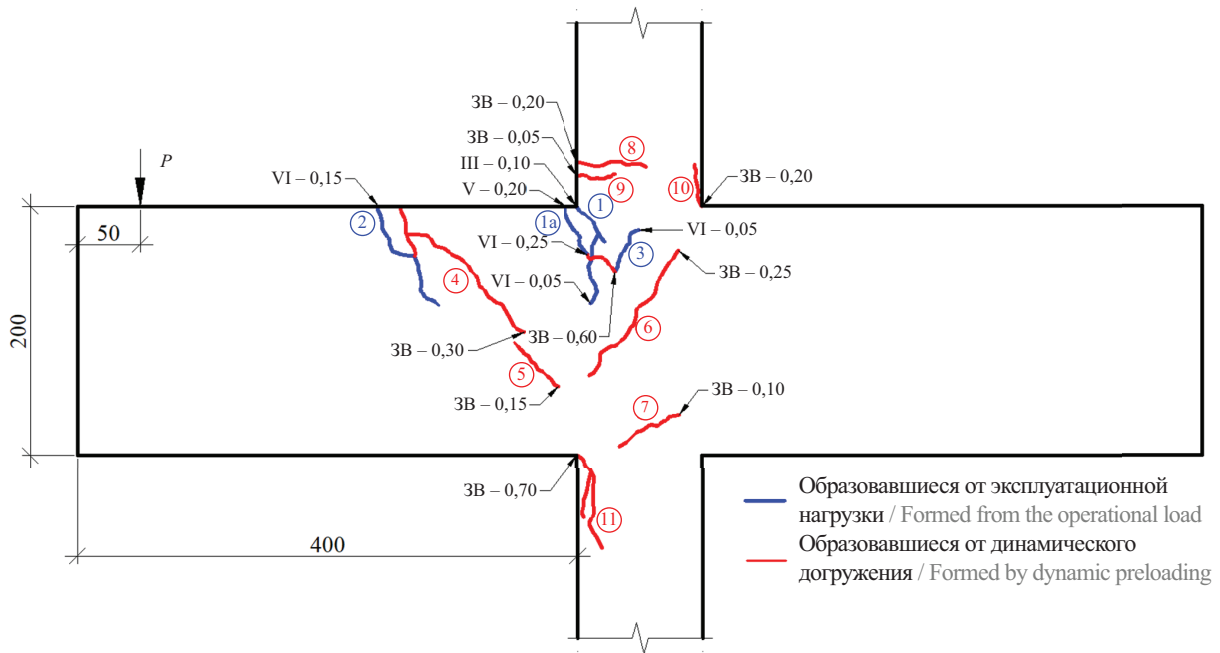


Рис. 4. Схема образования и раскрытия трещин всех типов при статико-динамическом нагружении

Fig. 4. Scheme of formation and opening of cracks of all types under static-dynamic loading

ветствующего эксплуатационной нагрузке, равной 60 % от максимального значения нагрузки, полученного при статических испытаниях.

Первой образовалась наклонная трещина из устья соединения ригеля и колонны, шириной раскрытия $a_{crc} = 0,10$ мм под углом 45° на глубину $h_{crc} = 22$ мм, следующая, на V ступени уже в ригеле, на расстоянии $l_{crc1} = 13$ мм, глубиной $h_{crc} = 37$ мм под углом 27° к нормали сечения ригеля. После чего на VI ступени они соединяются в одну и получают приращение вдоль грани колонны по нормали к продольной оси ригеля на глубину $h_{crc} = 77$ мм с шириной раскрытия $a_{crc} = 0,20$ мм, также на VI ступени образуется наклонная трещина под углом 32° к нормали сечения на расстоянии $l_{crc1} = 165$ мм, на этой же ступени образовалась наклонная сдвиговая трещина № 3 высотой $h_{crc} = 40$ мм и шириной раскрытия $a_{crc} = 0,05$ мм под углом 29° к продольной оси колонны. На этом при уровне, соответствующем величине эксплуатационной нагрузки, была приложена динамическая нагрузка¹.

После приложения динамической нагрузки существующие трещины не получили серьезного приращения как ширины, так и глубины, за исключением наклонной трещины шириной $a_{crc} = 0,60$ мм, соединившей трещины № 1 и 3, однако произошло образование и раскрытие новых восьми трещин (показаны красным цветом на рис. 4).

Покадровым анализом записей высокоскоростной видеокамеры было установлено, что сначала образовались наклонные трещины № 4 и 5 глубиной $h_{crc4} = 99$ мм и $h_{crc5} = 38$ мм, расположенные под углом 45° к нормальному сечению ригеля, ширина раскрытия $a_{crc4} = 0,30$ мм и $a_{crc5} = 0,15$ мм. Сле-

дующая группа наклонных трещин появилась в узловой зоне ригеля и колонны (трещины № 6 и 7), угол наклона к продольной оси составил 34 и 61° соответственно, после чего образовались нормальные трещины в колонне на расстоянии $l_{crc9} = 28$ мм и $l_{crc8} = 39$ мм над ригелем глубиной $h_{crc8} = 56$ мм и $h_{crc9} = 30$ мм соответственно, ширина их раскрытия составила $a_{crc8} = 0,20$ мм, $a_{crc9} = 0,05$ мм. На заключительном этапе колебательного процесса возникли продольные трещины в колоннах глубиной $h_{crc9} = 39$ мм и шириной раскрытия $a_{crc8} = 0,20$ мм над ригелем и глубиной $h_{crc10} = 72$ мм и шириной раскрытия $a_{crc11} = 0,70$ мм под ригелем. Общий вид образца после испытаний приведен на рис. 5.

Обобщая анализ трещинообразования при статическом и статико-динамическом нагружении, можно отметить схожий характер расположения трещин, но отличающийся в расположении нормальных трещин в колонне. При статическом нагружении они располагались под ригелем, а при статико-динамическом — над ригелем в зоне максимального и изгибающего момента в колонне. Также носят повторяющийся характер вертикальные трещины в колоннах, возникающие от сжатия. Нормальные и наклонные трещины в ригеле и узловой зоне имеют схожие углы наклона, отличаясь количеством и шириной раскрытия (при статическом нагружении больше трещин и меньше ширина их раскрытия, при статико-динамическом — меньше трещин, но больше ширина раскрытия), что объясняется многоступенчатостью приложения статической нагрузки, большим временным интервалом, в течение которого происходило поглощение энергии на раскрытии пластических шарниров, а также постепенное образование новых трещин

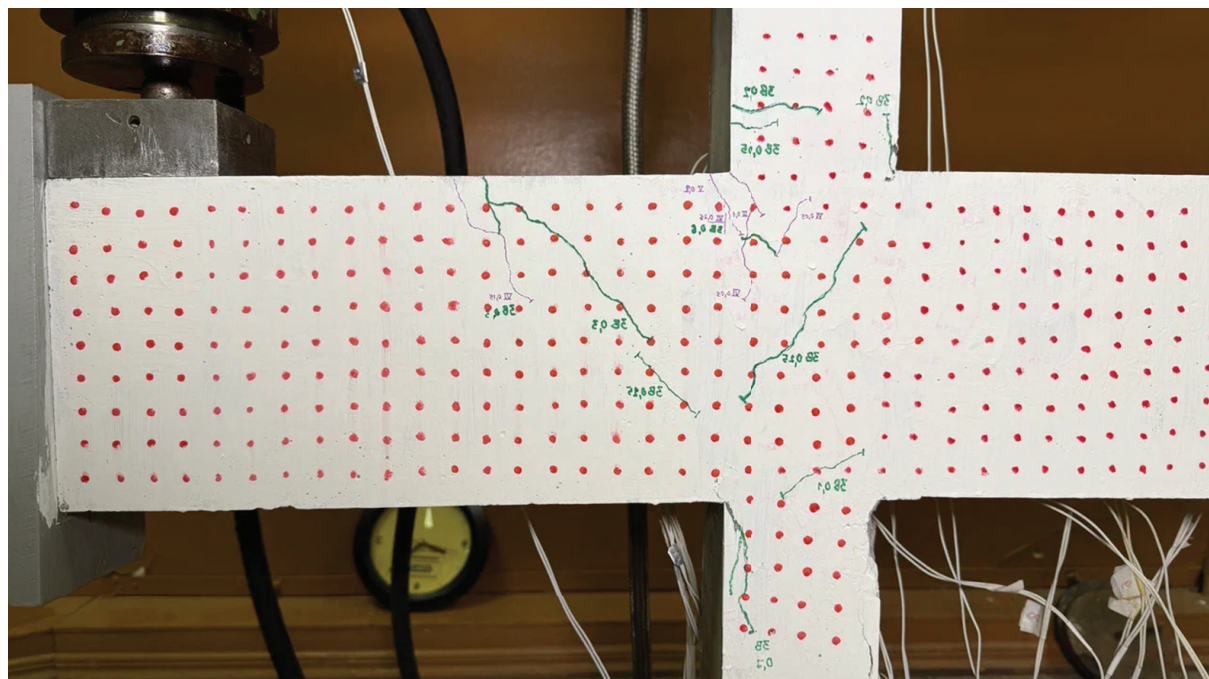


Рис. 5. Общий вид образования трещин при испытании статико-динамической нагрузкой

Fig. 5. General view of crack formation during static-dynamic load testing

и раскрытие уже существующих. При статико-динамическом режиме нагружения поглощение энергии деформации произошло за счет образования новых трещин с небольшим раскрытием и последующим закрытием до прежних значений трещин, возникших в процессе эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведения экспериментального исследования узлов сопряжения стержневых элементов из тяжелого бетона при статическом и статико-дина-

мическом нагружении получены результаты трещиностойкости, развития и раскрытия трещин, а также картины трещинообразования узлов сопряжения стержневых элементов при статическом и статико-динамическом нагружении. По результатам исследования отмечен схожий характер трещинообразования в узлах сопряжения при статическом и статико-динамическом нагружении в ригелях и колоннах. Отличительным является расположение нормальных трещин в колоннах, что объясняется многоступенчатостью и временным интервалом приложения статической нагрузки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колчунов В.И., Ильющенко Т.А., Федорова Н.В., Савин С.Ю., Тур В.В., Лизогуб А.А. Живучесть конструктивных систем зданий и сооружений: аналитический обзор исследований // Строительство и реконструкция. 2024. № 3 (113). С. 31–71. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-113-3-31-71. EDN FHLGWN.
2. Савин С.Ю., Шарипов М.З., Московцев В.С. Экспериментально-теоретическое исследование несущей способности длительно нагруженных железобетонных сжатых элементов при динамическом воздействии // Строительство и реконструкция. 2025. № 2 (118). С. 65–80. DOI: 10.33979/2073-7416-2025-118-2-65-80. EDN TBTLKB.
3. Травуш В.И., Колчунов В.И., Леонтьев Е.В. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в рамках законодательных и нормативных требований // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С. 46–54. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.02.46-54. EDN YXLQNV.
4. Sadek F., Bao Y., Main J.A., Lew H.S. Evaluation and enhancement of robustness for reinforced concrete buildings // Journal of Structural Engineering. 2022. Vol. 148. Issue 1. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0003226
5. Riedel K., Vollum R., Izzuddin B., Rust G. Robustness assessment of precast concrete connections using component-based modelling // Structures. 2024. Vol. 59. P. 105689. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105689
6. Zhao Z., Cheng X., Li Y., Diao M., Liu Y., Zhang W. Robustness analysis of dynamic progressive collapse of precast concrete beam-column assemblies using dry connections under uniformly distributed load // Engineering Structures. 2025. Vol. 323. P. 119206. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.119206

7. Карпенко Н.И., Белостоцкий А.М., Павлов А.С., Акимов П.А., Карпенко С.Н., Петров А.Н. Обзор методов расчета железобетонных конструкций при сложных напряженных состояниях с учетом физической нелинейности, анизотропии и конструктивной неоднородности. Часть 1: Разработки отечественных ученых // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году : сб. науч. тр. РААСН. Т. 2. 2020. С. 255–265. EDN WVFNAE.

8. Колчунов В.И., Тур В.В. Направления проектирования конструктивных систем в особых расчетных ситуациях // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 7. С. 5–15. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.07.05-15. EDN RNQPRJ.

9. Алмазов В.О., Плотников А.И., Расторгуев Б.С. Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению // Вестник МГСУ. 2011. Т. 1. № 2. С. 16–20. EDN OUVYJV.

10. Nav F.M., Usefi N., Abbasnia R. Analytical investigation of reinforced concrete frames under middle column removal scenario // Advances in Structural Engineering. 2018. Vol. 21. Issue 9. Pp. 1388–1401. DOI: 10.1177/1369433217746343

11. Федорова Н.В., Фан Д.К., Нгуен Т.Ч. Экспериментальные исследования живучести железобетонных рам с ригелями, усиленными косвенным армированием // Строительство и реконструкция. 2020. № 1 (87). С. 92–100. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-87-1-92-100. EDN ITILDU.

12. Fedorova N.V., Iliushchenko T.A. Influence of pre-stressing over parameters of diagram of static-dynamic deformation of RC elements // IOP Conference Series : materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687. Issue 3. P. 033033. DOI: 10.1088/1757-899X/687/3/033033

13. Deng X.-F., Liang S.-L., Fu F., Qian K. Effects of high-strength concrete on progressive collapse resistance of reinforced concrete frame // Journal of Structural Engineering. 2020. Vol. 146. Issue 6. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002628

14. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов В.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Коноров А.В. Основные результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций из высокопрочного бетона В100 круглого и кольцевого сечений при кручении с изгибом // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 1. С. 51–61. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-1-51-61. EDN YZIQCD.

15. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kapriyelov S.S., Demyanov A.I., Bulkin S.A. et al. Results of experimental studies of high-strength fiber reinforced concrete beams with round cross-sections under com-

bined bending and torsion // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2020. Vol. 16. Issue 4. Pp. 290–297. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-4-290-297. EDN JXJMCG.

16. Колчунов В.И. Метод расчетных моделей сопротивления для железобетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 3. С. 261–275. DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-3-261-275. EDN PUMWAG.

17. Федоров В.С., Баширов Х.З., Колчунов В.И. Элементы теории расчета железобетонных составных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2014. № 2. С. 116–118. EDN SNDSHP.

18. Lu J.X., Shen P., Ali H.A., Poon C.S. Mix design and performance of lightweight ultra high-performance concrete // Materials & Design. 2022. Vol. 216. P. 110553. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110553

19. Karamloo M., Mazloom M., Payganeh G. Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 123. Pp. 508–515. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.061

20. Sim J.I., Yang K.H., Kim H.Y., Choi B.J. Size and shape effects on compressive strength of lightweight concrete // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 38. Pp. 854–864. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.073

21. Луценко А.И., Арускин М.В. Исследование работы узлового сопряжения ригелей и колонн в сборно-монолитном железобетонном каркасе с применением системы автоматизированного проектирования // Современное строительство и архитектура. 2022. № 7 (31). С. 8–25. DOI: 10.18454/mca.2022.28.8.002. EDN MOJFVD.

22. Копаница Д.Г., Капарулин С.Л., Данильсон А.И., Устинов А.М., Усеинов Э.С., Шашков В.В. Динамическая прочность и деформативность узла сопряжения железобетонного каркаса // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 5 (52). С. 57–63. EDN VHMMTX.

23. Колчунов В.И., Ключева Н.В., Бухтиярова А.С. Сопротивление пространственных узлов сопряжения железобетонных каркасов многоэтажных зданий при запроектных воздействиях // Строительство и реконструкция. 2011. № 5 (37). С. 21–32. EDN OIRNVV.

24. Kim S.H., Kim H.D., Kang S.M., Hwang H.J., Choi H. Effect of joint details on progressive collapse resistance of precast concrete structures // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 69. P. 106217. DOI: 10.1016/j.job.2023.106217

25. Nguyen V.H., Tan K.H. Progressive collapse behaviour of advanced precast reinforced concrete joints with headed bars and plastic hinge relocation // Engineering Structures. 2023. Vol. 293. P. 116603. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116603

26. Jin L., Li X., Zhang R., Du X. Failure mechanism and dynamic response of reinforced concrete joints under impact load acting on beam ends // *International Journal of Impact Engineering*. 2024. Vol. 185. P. 104863. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104863

27. Ou Y.C., Joju J., Lai B.C., Wang J.C. Development and seismic performance evaluation of New high strength reinforced concrete column and steel beam (New-RCS) joint // *Engineering Structures*. 2023. Vol. 288. P. 116186. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116186

28. Ou Y.C., Joju J., Wang W.L. Composite RCS joint designs for circular high-strength reinforced concrete columns // *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 104. P. 112233. DOI: 10.1016/j.job.2025.11-2233

29. Wang D., Zhao J., Ju Y., Shen H., Li X. Behavior of beam-column joints with high performance fiber-reinforced concrete under cyclic loading // *Structures*. 2022. Vol. 44. Pp. 171–185. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.07.090

Поступила в редакцию 6 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 6 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 9 октября 2025 г.

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

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

Татьяна Александровна Ильющенко — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства; **Курский государственный университет (КГУ)**; 305000, г. Курск, ул. Радищева, д. 33; SPIN-код: 6913-5863, Scopus: 57213811914, ResearcherID: AAJ-6459-2021, ORCID: 0000-0001-6885-588X; tatkhulina93@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kolchunov V.I., Iliushchenko T.A., Fedorova N.V., Savin S.Y., Tur V.V., Lizahub A.A. Structural robustness: an analytical review. *Building and Reconstruction*. 2024; 3(113):31-71. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-113-3-31-71. EDN FHLGWH. (rus.).

2. Savin S.Yu., Sharipov M.Z., Moskovtseva V.S. Experimental and theoretical study of the performance of long-term loaded reinforced concrete members in compression under dynamic action. *Building and Reconstruction*. 2025; 2(118):65-80. DOI: 10.33979/2073-7416-2025-118-2-65-80. EDN TBTLKB. (rus.).

3. Travush V.I., Kolchunov V.I., Leont'yev E.V. Protection of buildings and structures against progressive collapse within the framework of legislative and regulatory requirements. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 2:46-54. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.02.46-54. EDN YXLQNV. (rus.).

4. Sadek F., Bao Y., Main J.A., Lew H.S. Evaluation and enhancement of robustness for reinforced concrete buildings. *Journal of Structural Engineering*. 2022; 148(1). DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0003226

5. Riedel K., Vollum R., Izzuddin B., Rust G. Robustness assessment of precast concrete connections

using component-based modelling. *Structures*. 2024; 59:105689. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105689

6. Zhao Z., Cheng X., Li Y., Diao M., Liu Y., Zhang W. Robustness analysis of dynamic progressive collapse of precast concrete beam-column assemblies using dry connections under uniformly distributed load. *Engineering Structures*. 2025; 323:119206. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.119206

7. Karpenko N., Belostotsky A., Pavlov A., Aki-mov P., Karpenko S., Petrov A. Review of methods of analysis of reinforced concrete structures under complex stress states with allowance for physical nonlinearity, anisotropy and structural inhomogeneity part 1: results of Soviet and Russian scientists. *Fundamental, exploratory and applied research of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2019 : collection of scientific papers of RAASN*. Vol. 2. 2020; 255-265. EDN WVFNAE. (rus.).

8. Kolchunov V.I., Tur V.V. Directions for the design of structural systems in accidental design situations. *Industrial and Civil Engineering*. 2023; 7:5-15. DOI:

10.33622/0869-7019.2023.07.05-15. EDN RNQPRJ. (rus.).

9. Almazov V.O., Plotnikov A.I., Rastorguev B.S. Problems of building's strength to progressive collapse. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 1-2:16-20. EDN OUVYJV. (rus.).

10. Nav F.M., Usefi N., Abbasnia R. Analytical investigation of reinforced concrete frames under middle column removal scenario. *Advances in Structural Engineering*. 2018; 21(9):1388-1401. DOI: 10.1177/1369433217746343

11. Fedorova N.V., Fang D.K., Nguyen T.Ch. Experimental life studies of reinforced concrete frames with girders reinforced by indirect reinforcement. *Building and Reconstruction*. 2020; 1(87):92-100. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-87-1-92-100. EDN ITILDU. (rus.).

12. Fedorova N.V., Iliushchenko T.A. Influence of pre-stressing over parameters of diagram of static-dynamic deformation of RC elements. *IOP Conference Series : materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 687. Issue 3. P. 033033. DOI: 10.1088/1757-899x/687/3/033033

13. Deng X.-F., Liang S.-L., Fu F., Qian K. Effects of high-strength concrete on progressive collapse resistance of reinforced concrete frame. *Journal of Structural Engineering*. 2020; 146(6). DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002628

14. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kaprielov S.S., Dem'yanov A.I., Konorev A.V. Main results of experimental studies of reinforced concrete structures of high-strength concrete B100 round and circular cross sections in torsion with bending. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019; 15(1):51-61. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-1-51-61. EDN YZIQCD. (rus.).

15. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kaprielov S.S., Demyanov A.I., Bulkin S.A. et al. Results of experimental studies of high-strength fiber reinforced concrete beams with round cross-sections under combined bending and torsion. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020; 16(4):290-297. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-4-290-297. EDN JXJMCG.

16. Kolchunov V.I. Method of computational models of resistance for reinforced concrete. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023; 19(3):261-275. DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-3-261-275. EDN PUMWAG. (rus.).

17. Fyodorov V.S., Bashirov H.Z., Kolchunov V.I. Elements of composite reinforced concrete construction calculation theory. *Academia. Architecture and Construction*. 2014; 2:116-118. EDN SNDSP. (rus.).

18. Lu J.X., Shen P., Ali H.A., Poon C.S. Mix design and performance of lightweight ultra high-performance concrete. *Materials & Design*. 2022; 216:110553. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110553

19. Karamloo M., Mazloom M., Payganeh G. Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2016; 123:508-515. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.061

20. Sim J.I., Yang K.H., Kim H.Y., Choi B.J. Size and shape effects on compressive strength of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2013; 38:854-864. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.073

21. Lutsenko A.I., Ariskin M.V. A study of the work of the node coupling of crossbars and columns in a half-precast monolithic reinforced frame using a computer-aided-design system. *Modern Construction and Architecture*. 2022; 7(31):8-25. DOI: 10.18454/mca.2022.28.8.002. EDN MOJFVD. (rus.).

22. Kopanitsa D.G., Kaparulin S.L., Danil'son A.I., Ustinov A.M., Useinov E.S., Shashkov V.V. Dynamic strength and deformability of beam-to-column joint. *Journal of Construction and Architecture*. 2015; 5(52):57-63. EDN VHMMTX. (rus.).

23. Kolchunov V.I., Kljueva N.V., Buhtijarova A.S. Strength of joints in spatial reinforced concrete frames of high rise buildings under actions beyond design basis. *Building and Reconstruction*. 2011; 5(37):21-32. EDN OIRNVV. (rus.).

24. Kim S.H., Kim H.D., Kang S.M., Hwang H.J., Choi H. Effect of joint details on progressive collapse resistance of precast concrete structures. *Journal of Building Engineering*. 2023; 69:106217. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.106217

25. Nguyen V.H., Tan K.H. Progressive collapse behaviour of advanced precast reinforced concrete joints with headed bars and plastic hinge relocation. *Engineering Structures*. 2023; 293:116603. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116603

26. Jin L. Li X., Zhang R., Du X. Failure mechanism and dynamic response of reinforced concrete joints under impact load acting on beam ends. *International Journal of Impact Engineering*. 2024; 185:104863. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104863

27. Ou Y.C., Joju J., Lai B.C., Wang J.C. Development and seismic performance evaluation of New high strength reinforced concrete column and steel beam (New-RCS) joint. *Engineering Structures*. 2023; 288:116186. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116186

28. Ou Y.C., Joju J., Wang W.L. Composite RCS joint designs for circular high-strength reinforced concrete columns. *Journal of Building Engineering*. 2025; 104:112233. DOI: 10.1016/j.jobbe.2025.112233

29. Wang D., Zhao J., Ju Y., Shen H., Li X. Behavior of beam-column joints with high performance fiber-reinforced concrete under cyclic loading. *Structures*. 2022; 44:171-185. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.07.090

Received August 6, 2025.

Adopted in revised form on October 6, 2025.

Approved for publication on October 9, 2025.

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

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

Tatiana A. Iliushchenko — Candidate of Technical Sciences, Associated Professor of the Department of Industrial and Civil Construction; **Kursk State University (KSU)**; 33 Radishcheva st., Kursk, 305000, Russian Federation; SPIN-code: 6913-5863, Scopus: 57213811914, ResearcherID: AAJ-6459-2021, ORCID: 0000-0001-6885-588X; tatkhulina93@yandex.ru.

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

The authors declare no conflicts of interest.

Разработка составов геополимерных бетонов

Александр Александрович Лунёв¹, Александр Викторович Явинский¹,
Сергей Валентинович Голиков², Петр Александрович Саньков²

¹ Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ); г. Омск, Россия;

² Сибирская генерирующая компания (СГК); г. Новосибирск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Глобальное потепление и значительный вклад цементной промышленности в выбросы углекислого газа (7–8 % от общего объема) делают поиск экологически безопасных альтернатив портландцементу актуальной задачей. Одной из таких альтернатив являются геополимеры — безобжиговые вяжущие материалы, получаемые путем щелочной активации алюмосиликатного сырья. Геополимеры превосходят портландцемент по энергоэффективности, ресурсосбережению и экологичности, а их структура и химический состав принципиально отличаются от традиционных цементов. Использование геополимеров в строительной отрасли может позволить значительно снизить затраты на строительство и улучшить экологическую обстановку в регионах.

Материалы и методы. Рассмотрены зола-уноса, золошлаковая смесь, молотый гранулированный доменный шлак, калиевое и натриевое жидкое стекло, которые использовались для приготовления геополимерного вяжущего. Для определения прочности образцов вяжущего применялся пресс ИР 5081-5. Прочность геополимерного бетона испытывалась с помощью пресса ТП-1-350. Испытание на морозостойкость проводилось по ускоренному методу с использованием климатической камеры. Водонепроницаемость определялась с помощью прибора АГАМА-2РМ.

Результаты. Представлены результаты комплексных испытаний по подбору состава геополимерного вяжущего и бетонов на его основе в качестве альтернативы тяжелому бетону на портландцементном вяжущем. Подобраны составы геополимерного бетона, которые соответствуют классам бетона В15, В20, В22,5, В25, В30. Изучено влияние тепловлажностной обработки (ТВО) на прочность получаемого геополимерного вяжущего.

Выводы. Проведены химические и физико-механические испытания компонентов геополимерного вяжущего. Изучено влияние вида используемого жидкого стекла и ТВО на прочность геополимерного вяжущего. Подобраны рациональные составы геополимерного вяжущего и бетонов на его основе. Получены данные испытаний геополимерного бетона на водонепроницаемость, прочность при сжатии и изгибе, пористость, морозостойкость. У геополимерных смесей измерена осадка конуса. По результатам испытаний можно сделать вывод, что представленные составы геополимерного вяжущего классом до В30 можно использовать в строительной отрасли в качестве альтернативы портландцементным бетонам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, геополимерное вяжущее, геополимерный бетон, зола-уноса, молотый гранулированный доменный шлак, вяжущее, морозостойкость, тепловлажностная обработка

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллегам и анонимным рецензентам за время, затраченное на рассмотрение статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лунёв А.А., Явинский А.В., Голиков С.В., Саньков П.А. Разработка составов геополимерных бетонов // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 10. С. 1553–1564. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1553-1564

Автор, ответственный за переписку: Александр Викторович Явинский, 121qqz@mail.ru.

Development of geopolymer concrete compositions

Aleksandr A. Lunev¹, Alexander V. Yavinskiy¹, Sergey V. Golikov², Petr A. Sankov²

¹ The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI); Omsk, Russian Federation;

² Siberian Generating Company; Novosibirsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Global warming and the cement industry's significant contribution to carbon dioxide emissions (7–8 % of the total) make the search for environmentally friendly alternatives to Portland cement an urgent challenge. One of the most promising alternatives is geopolymers — heat-free binders produced through the alkaline activation of aluminosilicate raw materials. Geopolymers outperform conventional cement in terms of energy efficiency, resource conservation, and environmental performance, and their structure and chemical composition fundamentally differ from those of traditional cements. The use of geopolymers in construction can substantially reduce costs and improve the environmental situation in the regions.

Materials and methods. The materials investigated included fly ash, ash-and-slag mixture, ground granulated blast-furnace slag, potassium and sodium silicate solutions used for the preparation of the geopolymer binder. An IR 5081-5 press was employed to determine the strength of the binder specimens, while the strength of geopolymer concrete was tested using a TP-1-350 press. Frost resistance was evaluated using an accelerated method in a climate chamber. Water permeability was determined with an AGAMA-2PM testing apparatus.

Results. The study presents the results of a comprehensive investigation into the selection of geopolymer binder and concrete compositions as alternatives to conventional heavy concrete based on cement binders. The developed geopolymer concrete compositions correspond to concrete strength classes B15, B20, B22.5, B25, and B30. The effect of heat and moisture treatment on the strength characteristics of the geopolymer binder was examined.

Conclusions. Chemical and physico-mechanical analyses of the geopolymer binder components were carried out. The influence of the type of silicate solution and of the heat-and-moisture curing regime on the binder strength was investigated. Rational compositions of geopolymer binders and corresponding concretes were developed. Test results on water resistance, compressive and flexural strength, porosity, and frost resistance were obtained, and the workability of geopolymer mixtures (cone slump) was evaluated. According to the findings, geopolymer binder compositions up to class B30 can be successfully applied in the construction industry as an environmentally friendly alternative to Portland-cement concretes.

KEYWORDS: geopolymer concrete, alkali-activated binder, fly ash, slag, curing regime, compressive strength, sustainable construction materials

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the editorial board and anonymous reviewers for their valuable comments and time dedicated to reviewing the paper.

FOR CITATION: Lunev A.A., Yavinskiy A.V., Golikov S.V., Sankov P.A. Development of geopolymer concrete compositions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(10):1553-1564. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1553-1564 (rus.).

Corresponding author: Alexander V. Yavinskiy, 121qqz@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальное потепление стало одной из ключевых проблем современности. Производство цемента вносит значительный вклад в выбросы углекислого газа (CO_2), занимая второе место среди источников парниковых газов. На его долю приходится около 7–8 % от общего объема выбросов CO_2 в атмосферу [1, 2]. В связи с этим поиск экологически безопасных альтернатив портландцементу становится все более актуальным. Одной из таких альтернатив являются безобжиговые вяжущие материалы, получаемые путем щелочной активации, которые отличаются меньшим воздействием на окружающую среду.

Геополимеры — это разновидность минеральных вяжущих материалов, которые производятся путем щелочной активации алюмосиликатного сырья природного или техногенного происхождения. Они превосходят портландцемент по энергоэффективности, ресурсосбережению и экологичности. Химический состав и структура геополимеров принципиально отличаются от портландцемента. Если портландцементный камень образует кальцево-силикатный гидрогель с тоберморитоподобной слоистой структурой, то геополимерный камень — это каркасный алюмосиликат, состоящий из тетраэдров $[\text{SiO}_4]$ и $[\text{AlO}_4]$, соединенных общими вершинами.

Геополимеры представляют собой синтетические неорганические материалы полимерной структуры, в которых атомы кремния и алюминия чередуются в цепях. В зависимости от последовательности этих атомов выделяют три основных типа геополимеров:

1. Поли(сиалат) ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-$).
2. Поли(сиалат-силоксан) ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$).
3. Поли(сиалат-дисилоксан) ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$) [4].

Исследования геополимерных вяжущих начались еще в 1930-х гг., но системный подход к их из-

учению и внедрению в промышленность был разработан только в 1950–1970-х гг. В.Д. Глуховским и его последователями. Позже, в 1980-х гг., Джозеф Давидовиц провел важные исследования, изучая древнеегипетские сооружения из искусственных пород. Его работы легли в основу современной теории геополимерных вяжущих, которые сегодня применяются в археологии, для консервации токсичных отходов и создания геополимерных бетонов [3–5].

Однако исследования Д. Давидовица были сосредоточены на археологических материалах, которые существенно отличаются от современных промышленных отходов, таких как зола-уноса (ЗУ) или шлаки. В частности, он не рассматривал вопросы применения гранулированных шлаков, которые имеют иной минеральный состав по сравнению с доменными шлаками медленного охлаждения. Его работы базировались на изучении ЗУ, которая широко распространена в Европе, но в России встречается в ограниченных количествах.

Современные исследования геополимеров в основном сосредоточены на использовании ЗУ [6], цеолитов [7], метакрилатов [8] и других глинистых материалов [9, 10]. Также изучаются возможности активации отходов мрамора, травертина и вулканического туфа [11]. Однако особенности создания геополимерных вяжущих на основе золошлаковых материалов остаются малоизученными. Это связано с различиями в химическом составе, крупности частиц и других характеристик золошлаков по сравнению с ЗУ. Кроме того, недостаточно исследованы свойства ЗУ различного происхождения.

Часто гибридные вяжущие материалы изготавливаются на основе ЗУ с добавлением молотого доменного гранулированного шлака [12]. Такие добавки повышают прочность и устойчивость геополимеров к водопоглощению благодаря снижению сорбционной способности. Если содержание шлака в составе невелико, высоких прочностных характеристик можно достичь путем пропаривания изделий при темпе-

патуре 60 °С [13]. В качестве активаторов используются силикаты [14], гидроксид натрия [15], гидроксид калия, сульфат натрия [2, 16], фосфорная кислота [17] и другие вещества. Гидроксид натрия ускоряет реакцию и способствует растворению алюмосиликатов, а гидроксид калия улучшает степень полимеризации [18].

Один из недостатков щелочной активации — наличие свободного гидроксида натрия, который может вызывать коррозию металлов [19]. Помимо этого, высокая концентрация углекислого газа также способствует коррозии, что делает использование гибридных вяжущих в сочетании с арматурой нежелательным [20]. Добавка фосфорной кислоты снижает прочность геополимеров, что негативно сказывается на их физико-механических характеристиках [17].

На свойства геополимерных вяжущих влияет несколько факторов:

- соотношение Si/Al в исходном материале;
- тип и количество щелочного активатора;
- температура и условия твердения;
- использование дополнительных добавок для создания пористой структуры, аналогичной пенобетону [18, 21]. Особое внимание уделяется влиянию соотношения Si/Al на свойства вяжущих [22].

Прочность геополимерных материалов может достигать 40–80 МПа, хотя для строительных целей достаточно значений от 25 МПа [23]. Они обладают высокой сульфатостойкостью, что делает их пригодными для использования в качестве альтернативы сульфатостойкому цементу [24].

Таким образом, данные материалы потенциально могут выступать альтернативой портландцементному вяжущему для создания товарных бетонов и бетонных изделий. Учитывая этот факт, а также необходимость реализации комплексного плана по повышению объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности, утвержденного Распоряжением Правительства Российской Федерации от 15.06.2022 № 1557, цель настоящего исследования — оценить возможность создания геополимер-

ных бетонов на основе ЗУ крупнейшей угольной электростанции РФ Рефтинской ГРЭС.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- оценить влияние основных компонентов (ЗУ, молотого гранулированного доменного шлака, гидроксидов щелочного металла и жидкого стекла) на прочность получаемого геополимерного вяжущего в условиях естественного твердения и тепловлажностной обработки;
- оценить влияние вида щелочного активатора на свойства геополимерных вяжущих;
- спроектировать составы бетонов на наиболее прочных составах вяжущего и оценить их свойства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Золы-уноса (влажная зола-уноса открытого хранения (ВЗУ) с территории золоотвала и ЗУ сухого отбора) предоставлены Рефтинской ГРЭС.

Молотый гранулированный доменный шлак (МГДШ) был предоставлен ООО «Мечел-Материалы» и произведен на ПАО «Челябинский металлургический комбинат». МГДШ не обладает собственной гидравлической активностью.

Для экспериментов использовалось натриевое жидкое стекло (водных щелочных растворов силикатов натрия $Na_2O(SiO_2)_n$) производства ООО НПК «СИЛЕКС» с плотностью 1460 кг/м³, силикатным модулем 2,28, массовой долей диоксида кремния 28,13 % и оксида натрия 12,43 % соответственно. Для сравнения оценена эффективность применения калиевого жидкого стекла с плотностью 1410 кг/м³, силикатным модулем 2,28, массовой долей диоксида кремния 23,65 % и оксида калия 16,24 % соответственно, производства ООО НПК «СИЛЕКС».

В качестве щелочного компонента использовались гранулированные формы NaOH и КОН, которые поставлялись ООО «Омскреактив». Гранулы измельчались в мельнице МГ-1Ф до размеров менее 0,02 мм для удобства дозирования в лаборатории. По степени чистоты использованные гидроксиды натрия и калия — технические, безводные.

Табл. 1. Физические характеристики используемых материалов

Table 1. Physical characteristics of the materials used

Параметр / Parameter	ЗУ / Fly ash	ВЗУ / Wet fly ash	МГДШ / Ground granulated blast furnace slag
Влажность, % / Moisture content, %	1,1	32,2	0,3
Потери при прокаливании, % Losses to calcination, %	3,0	3,5	–
Удельная поверхность, м²/кг / Unit surface, m²/kg	312,0	166,5	518,0
Остаток на сите 008, % / Sieve 008 residue, %	15,4	14,8	3,1
Насыпная плотность, кг/м³ / Bulk density, kg/m³	0,79	0,79	1,68
Истинная плотность, кг/м³ / True density, kg/m³	1,84	1,80	2,31
Индекс активности 28 сут/90 сут 28/90-day activity index	0,77/0,65	0,61/0,51	0,50/0,35

Табл. 2. Результаты определения химического состава

Table 2. Results of chemical composition determination

Материал / Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MnO	Прочие* / Other*
ЗУ / Fly ash	61,27	26,9	2,10	0,92	0,3	0,72	0,59	4,80	–	2,4
ВЗУ / Wet fly ash	55,61	30,7	2,31	0,54	0,1	0,53	0,45	6,35	–	3,41
МГДШ / Ground granulated blast furnace slag	37,83	8,89	39,87	6,61	0,56	–	–	2,35	3,89	–

Примечание: * — прочие соединения, в том числе потери при прокаливании.

Note: * — other compounds, including losses to calcination.

Для испытаний использовалась водопроводная питьевая вода. Водородный показатель (рН) 7,7, содержание растворимых солей 65 мг/л, в том числе ионы SO₄ — 28,4 мг/л, хлориды — 15 мг/л.

Определили характеристики материалов: влажность по ГОСТ 8735–88; потерю массы при прокаливании по ГОСТ 11022–95; тонкость помола по удельной поверхности по ГОСТ 310.2–76; значения истинной плотности согласно ГОСТ 310.2–76; насыпную плотность в сухом состоянии по ГОСТ 9758–2012; установление индекса активности по приложению Д ГОСТ 25818–2017. Результаты определения физических характеристик сведены в табл. 1.

Определение химического состава проводилось в соответствии с ГОСТ 8269.1–97. Значения показателей химического состава изученных материалов сведены в табл. 2.

Для подбора состава геополимерного бетона использовался песок природный с влажностью 5,2 %, насыпной плотностью 1640 кг/м³, истинной плотностью 2480 кг/м³, пустотностью 0,34 и модулем крупности 3,06, а также гранитный щебень влажностью 1,0 %, насыпной плотностью 1450 кг/м³, истинной плотностью 2630 кг/м³, пустотностью 0,45, маркой по дробимости М1400 с 6 % лещадных частиц.

Методы испытаний

Сущность экспериментов сводилась к приготoвлению вяжущих щелочной активации (активатор из смеси гидроксида щелочного металла (калия или натрия) и жидкого стекла (водного раствора си-

ликата натрия или калия соответственно)) на основе побочных продуктов промышленного производства.

Выполнялось три цикла экспериментальных исследований:

- исследование влияния соотношения компонентов вяжущего на его прочность в условиях твердения в нормальных условиях;
- изучение влияния соотношения компонентов вяжущего на его прочность в условиях тепловлажностной обработки (ТВО);
- исследование возможности получения товарных бетонов с нормируемыми показателями прочности.

Первый цикл. В рамках первого цикла осуществлялся ряд полных факторных экспериментов, в которых варьировалось содержание МГДШ, щелочного компонента и жидкого стекла. Для каждого состава оценивалась прочность образцов геополимерного вяжущего в условиях нормального твердения в возрасте 7 и 28 сут.

В рамках эксперимента по оценке влияния состава вяжущего проводилось изготовление образцов для определения предела прочности на сжатие с различным содержанием компонентов, описанных в табл. 3 (составы 1–8). Для ряда материалов были введены дополнительные составы 9–11, которые выявляли влияние жидкого стекла на образцы.

Смешивание геополимерного вяжущего велось в химически нейтральной посуде (полиэтилен высокой плотности). Для подготовки образцов применялись формы-кубы ФК20-6 размерами 20 × 20 × 20 мм. В целях предотвращения сцепления вяжу-

Табл. 3. Рецептуры исследуемых геополимерных вяжущих

Table 3. Recipes of investigated geopolymer binders

Компонент / Component	Номер состава / Composition number										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
МГДШ, % / Ground granulated blast furnace slag, %	10	10	10	10	30	30	30	30	20	20	20
ЗУ / Fly ash	90	90	90	90	70	70	70	70	80	80	80
NaOH (KOH), %*	1	1	5	5	1	1	5	5	3	3	3
Жидкое стекло, %* Liquid glass, %*	10	30	10	30	10	30	10	30	20	10	30

Примечание: * — компоненты, входящие в щелочной активатор, считались сверх 100 % от массы сухой фазы.

Note: * — alkaline activator ingredients are added to 100 % of dehydrated material.



Рис. 1. Подготовка проб в формах-кубах: *a* — образцы в формах; *b* — испытания образцов
Fig. 1. Preparation of specimens in cubic molds: *a* — specimens in molds; *b* — testing of specimens

щего с формой в качестве смазки-разделителя использовали технический вазелин.

Для равномерного распределения смеси по форме выполнялось уплотнение на вибростоле VIBR-X-15 в течение 2 мин. Формы с материалом помещали в камеру нормального твердения КНТ-1 (рис. 1). Через сутки после формовки проводилась распалубка форм, образцы помещали в камеру нормального твердения для набора прочности при температуре 22 °С.

После выбранного режима подготовки образцов измеряли габаритные размеры образцов с помощью штангенциркуля. Образцы осматривали на предмет наличия дефектов (трещин, лакун и прочего). Пригодные для испытания образцы испытывали для определения предела прочности на сжатие на прессе ИР 5081-5 со скоростью 6 мм/мин (рис. 1).

Для состава с наилучшей прочностью дополнительно определялась нормальная густота цементного теста по ГОСТ 310.3–76. Сроки схватывания устанавливались в соответствии с ГОСТ 30744–2001 и ГОСТ 310.3–76 на приборе Вика. Помимо вяжущих, на основе ЗУ и МГДШ решено дополнительно проверить возможность получения геополимеров без добавления молотого гранулированного доменного шлака.

Второй цикл. Испытания с тепловлажностной обработкой выполняли аналогичным образом с циклом 1 до момента распалубки образцов. После готовности проб к ТВО процедуру выполняли по следующему алгоритму: первые три часа поднимали

температуру до 90 °С, затем в течение шести часов выдерживали при проектной температуре, после чего за три часа снижали температуру до 22 °С.

Третий цикл. На основе ГОСТ 27006–2019 были спроектированы следующие смеси, которые приведены в табл. 4.

Определение удобоукладываемости осуществляли по ГОСТ 10181–2014. Среднюю плотность бетонной смеси характеризуют отношением массы уплотненной бетонной смеси к ее объему в соответствии с ГОСТ 10180–2012. Пористость бетонной смеси оценивали расчетным методом в соответствии с п. 6.4 ГОСТ 10181–2000.

Прочность при сжатии бетона определяли с помощью прессы ТП-1-350 по методике ГОСТ 10180–2012 на образцах-кубах с ребром 10 см (испытанию подвергались серии образцов из 6 шт.). Прочность бетона при изгибе устанавливалась по ГОСТ 10180–2012. Для выявления прочности бетона при изгибе изготавливали образцы призмы квадратного сечения (рис. 2).

Морозостойкость бетона определяли ускоренным методом по ГОСТ 10060–2012. Испытание проводили по второму методу на образцах-кубах с ребром 10 см. Для этого образцы насыщались в 5 %-ном водном растворе хлорида натрия и помещались в климатическую камеру с температурой –50 °С в закрытых емкостях.

Для установления водонепроницаемости подготавливали по шесть образцов-кубов с размером

Табл. 4. Составы геополимерного бетона
Table 4. Compositions of geopolymer concrete

Номер Number	Состав, кг/м³, бетонной смеси / Composition of concrete, kg/m³						
	Песок Sand	Щебень Crushed stone	ЗУ Fly ash	МГДШ / Ground granulated blast- furnace slag	Вода Water	Жидкое стекло Liquid glass	Едкий натр Caustic soda
1	818	1080	247,5	112,5	112,1	112,5	18
2	746,9	1080	297,0	135,0	127,7	135,0	21,6
3	723,2	1080	313,5	142,5	132,9	142,5	22,8
4	691,6	1080	335,5	152,5	139,8	152,5	24,4
5	660	1080	357,5	162,5	146,7	162,5	26



Рис. 2. Определение прочности (а); морозостойкости (b)
Fig. 2. Determination of strength (a); frost resistance (b)

ребра 150 мм. Водонепроницаемость определяли с помощью прибора АГАМА-2РМ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты исследований геополимерных вяжущих

Результаты испытаний по выявлению предела прочности на сжатие образцов вяжущих на основе сухой ЗУ и МГДШ на натриевом жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС» после твердения приведены в табл. 5.

Были апробированы составы с влажной ЗУ. Результаты испытаний по определению предела прочности на сжатие образцов вяжущих на основе влаж-ВЗУ и МГДШ на натриевом жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС» после твердения представлены в табл. 6.

Данные результаты показывают, что смеси с добавлением МГДШ в нормальных условиях обладают широким потенциалом для применения, поскольку

их прочность обладает значениями, потенциально обеспечивающими создание бетонов марок от В3,5 до В30. В то же время ТВО практически не повышает их прочность и может использоваться как замена твердению в нормальных условиях для целей настоящей работы.

Результаты испытаний по определению предела прочности на сжатие образцов вяжущих на основе сухой и влажной ЗУ и МГДШ на натриевом жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС» показали, что применение влажных ЗУ снижает прочность получаемых геополимерных вяжущих в среднем на 36 %.

Для повышения репрезентативности было принято решение провести сходные испытания не только на жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС», но и на имеющемся аналоге, поставляемом ООО «Омскреактив» (силикатный модуль 2,68, плотность 1480 кг/м³). Результаты испытаний по установлению предела прочности на сжатие образцов вяжущих на основе сухой ЗУ и МГДШ на натриевом

Табл. 5. Результаты определения предела прочности на сжатие вяжущих на основе сухой золы-уноса и МГДШ на натриевом жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС»

Table 5. Determinations of ultimate compressive strength of binders containing dry fly ash and ground granulated blast-furnace slag with sodium liquid glass, produced by R&D company SILEKS Ltd, a limited liability company

Схема подготовки Preparation procedure	Номер состава / Composition number										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7 сут / 7 days	0,9	10,7	1,4	15,4	1,4	19,2	11,8	22,7	9,7	1,2	16,6
28 сут / 28 days	0,8	18,8	3,8	33,0	1,4	28,5	15,9	44,7	22,9	1,9	32,1
ТВО / Vacuum heat treatment	3,1	18,4	4,3	27,2	1,2	25,1	16,5	38,4	23,1	3,6	27,9

Табл. 6. Результаты определения предела прочности на сжатие вяжущих на основе влажной золы-уноса и молотого гранулированного доменного шлака на натриевом жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС»

Table 6. Determinations of compressive strength of binders containing wet fly ash and ground granulated blast furnace slag with sodium liquid glass produced by R&D company SILEKS Ltd, a limited liability company

Схема подготовки Preparation procedure	Номер состава / Composition number										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7 сут / 7 days	0,3	7,6	0,6	7,9	1,3	16,1	8,0	25,5	8,5	1,6	16,4
28 сут / 28 days	0,6	13,3	1,4	17,9	1,0	19,6	11,1	37,3	13,3	0,8	24,9
ТВО / Vacuum heat treatment	0,0	11,8	2,2	29,2	0,9	25,1	18,5	37,6	7,4	0,9	21,6

Табл. 7. Результаты определения предела прочности на сжатие вяжущих на основе сухой ЗУ и МГДШ на натриевом жидком стекле ООО «Омскреактив»

Table 7. Determinations of compressive strength of binders containing dry fly ash and ground granulated blast furnace slag with sodium liquid glass produced by Omskreactiv Ltd.

Схема подготовки Preparation procedure	Номер состава / Composition number										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7 сут / 7 days	1,2	12,0	2,3	20,0	1,9	16,9	14,6	29,5	17,0	2,2	27,9
28 сут / 28 days	2,4	11,3	4,1	17,4	2,8	15,2	14,0	22,9	20,4	3,6	21,8
TBO / Vacuum heat treatment	0,7	7,6	4,3	9,0	1,2	17,9	16,2	21,8	20,5	3,6	28,8

Табл. 8. Результаты определения предела прочности на сжатие вяжущих на основе сухой ЗУ и МГДШ на калиевом жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС»

Table 8. Determinations of compressive strength of binders containing dry fly ash and ground granulated blast furnace slag with potassium liquid glass produced by R&D company SILEKS Ltd, a limited liability company

Схема подготовки Preparation procedure	Номер состава / Composition number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
7 сут / 7 days	2,4	12,4	4,4	15,3	4,3	15,9	26,6	28,5
28 сут / 28 days	3,9	15,7	13,6	16,1	9,4	24,0	36,4	36,2
TBO / Vacuum heat treatment	1,6	16,6	13,7	19,2	4,1	17,7	18,1	24,1

жидком стекле ООО «Омскреактив» после твердения приведены в табл. 7.

Данные показывают, что смеси с добавлением МГДШ на жидком стекле ООО «Омскреактив» имеют сходное поведение с вяжущими на жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС». В то же время обладают меньшей прочностью, вероятно, обусловленной большим силикатным модулем.

Результаты испытаний по определению предела прочности на сжатие образцов вяжущих на основе сухой ЗУ и МГДШ на калиевом жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС» после твердения приведены в табл. 8.

Результаты испытаний по определению предела прочности на сжатие образцов вяжущих на основе сухой ЗУ и МГДШ на калиевом жидком стекле ООО НПК «СИЛЕКС» выявили, что применение калиевых активаторов твердения показывает максимальную прочность не выше, чем у тех же составов на натриевом стекле (максимальная прочность на 19 % ниже, чем на натриевом стекле). Учитывая это и повышенную стоимость калиевого стекла, дальнейшие исследования с ним не проводились.

С учетом эффективности применения вяжущих на основе ЗУ и МГДШ было решено дополнительно проверить возможность получения геополимеров без добавления молотого гранулированного доменного шлака. Результаты испытаний по определению предела прочности на сжатие образцов вяжущих на основе ЗУ (без добавления МГДШ) после твердения приведены в табл. 9.

Данные результаты показывают, что смеси без добавления МГДШ с использованием натриевого и калиевого жидкого стекла в нормальных условиях практически не обладают потенциалом для применения, поскольку не позволяют создать бетоны с классом выше В3,5. Тепловлажностная обработка, хотя и повышает прочность составов с использованием натриевого жидкого стекла, не позволяет получить бетоны классом свыше В15.

ТВО повышает их прочность при использовании натриевого жидкого стекла. В то же время для ряда направлений применения такие смеси могут быть пригодны и требуют дальнейшей проработки.

В качестве наилучшего состава, который решено использовать для опытного подбора состава бес-

Табл. 9. Результаты испытаний вяжущих на основе золы-уноса (без МГДШ)

Table 9. Test results of fly ash binders (without ground granulated blast furnace slag)

Компонент / Ingredient	Номер состава (натриевое жидкое стекло) Composition number (sodium liquid glass)					Номер состава (калиевое жидкое стекло) Composition number (potassium liquid glass)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
NaOH (KOH)	1	1	5	5	3	1	1	5	5	3
Жидкое стекло Liquid glass	10	30	10	30	20	10	30	10	30	20
7 сут / 7 days	1,4	–	2,6	–	2,7	2,7	3,9	4,9	–	6,5
28 сут / 28 days	2,5	–	5,0	–	3,2	3,4	5,2	5,4	–	6,2
TBO Vacuum heat treatment	10,0	16,2	16,3	–	21,3	1,1	3,0	1,7	6,0	1,8

Табл. 10. Сводная ведомость результатов оценки свойств геополимерных бетонов

Table 10. Summarized assessment of geopolymer concrete properties

Номер / Number	Прочность на сжатие, МПа Compressive strength, MPa	Прочность на растяжение при изгибе, МПа / Bending tensile strength, MPa	Пористость, % Porosity, %	Средняя плотность, кг/м³ Average density, kg/m³	Водопроницаемость Water resistance	Прочность на сжатие после замораживания, МПа / Compressive strength after freezing, MPa					Осадка, см Settlement, cm
						F75	F100	F150	F200	F300	
1	19,4	4,3	18,5	2033,7	W 2	15,0	14,3	–	–	–	1
2	26,3	4,7	18,0	2084,2	W 4	24,3	24,0	22,5	–	–	1
3	29,0	5,0	14,9	2120,2	W 4	28,2	27,9	24,9	–	–	1
4	32,4	6,2	13,5	2145,1	W 6	30,3	29,4	29,0	27,8	22,8	1
5	39,8	7,4	12,6	2143,9	W 8	42,4	42,1	40,0	40,2	37,2	1

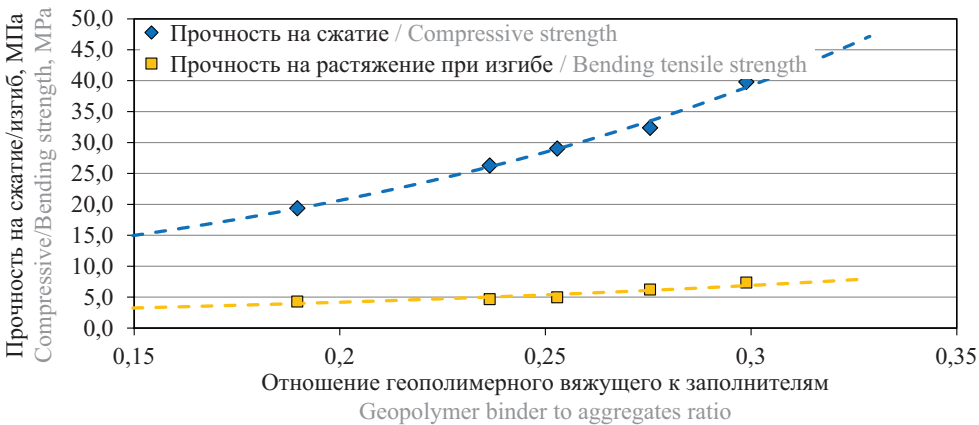


Рис. 3. Зависимость прочности от количества геополимерного вяжущего

Fig. 3. Dependence of strength on the geopolymer binder content

цементного (геополимерного) бетона, применено геополимерное вяжущее в виде состава № 8 (табл. 6) в различных его содержаниях. Данный состав показал, что для него характерна нормальная густота 8,5 %, начало схватывания 31 мин, а конец схватывания 110 мин. Полученные рецептуры геополимерных бетонов приведены в табл. 4.

Результаты исследований геополимерных бетонов. Результаты испытаний бетонных смесей были сведены в табл. 10.

Для всех смесей, как и в работе [25], была отмечена малая осадка конуса, которая говорит о необходимости введения пластификаторов, что является следующей ступенью необходимых исследований. Добавление микрокремнезема также потенциально значительно снижает предел текучести и пластическую вязкость бетонов, что отражено в исследовании [25] и может способствовать улучшению подвижности бетона.

Работа с пластификаторами, вероятно, также позволит получить смеси с большим содержанием золы-уноса в составе (или ВЗУ в качестве запол-

нителя), поскольку более плотная упаковка частиц даст возможность увеличить плотность и прочность бетонной смеси. Поэтому в рамках дальнейших исследований требуется изучение возможности замены части заполнителя (песка) на золошлаковые материалы или ЗУ, что в перспективе может привести к увеличению доли вовлекаемых ВЗУ (опыт работы с традиционными бетонами показывает возможность замены до 40 % песка ВЗУ).

В табл. 10 также приведены составы бетонных смесей, которые обладали проектной прочностью. На рис. 3 показана зависимость количества геополимерного вяжущего и прочность получаемых бетонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При ТВО геополимерного вяжущего и геополимерного бетона их прочность практически не повышается по сравнению с твердением образцов в нормальных условиях. Таким образом, предлагаемые составы в отличие от многих аналогов не требуют проведения высокоэнергозатратной тепловлажност-

ной обработки и могут использоваться для строительных работ непосредственно на площадке.

Применение ВЗУ снижает прочность получаемых геополимерных вяжущих в среднем на 36 % по сравнению с составами на сухих ЗУ.

Использование калиевого и натриевого жидкого стекла в качестве активаторов твердения показывает сопоставимую прочность получаемых материалов, но с учетом повышенной стоимости калиевых стекол (в 2,0–2,5 раза выше, чем у натриевых) делает его менее целесообразным для промышленного применения.

Смеси без добавления МГДШ в нормальных условиях имеют прочность, не позволяющую создать бетоны с классом выше В3,5. ТВО повышает их прочность при использовании натриевого жидкого стекла, что потенциально дает возможность получить бетоны класса до В15.

Результаты подбора состава показали, что возможно получение составов с классом по прочности: В15, В20, В22,5, В25, В30. Полученные в рамках исследования составы могут быть использованы в виде товарного бетона или для создания бетонных изделий, однако рекомендуется продолжить исследования в области геополимерных бетонов для оптимизации составов, повышения качества матери-

алов и увеличения доли используемых ВЗУ (в том числе для замены заполнителя).

Поскольку значительную долю стоимости геополимеров составляют щелочные активаторы [26], для снижения стоимости получаемых геополимеров требуется провести поиск и оценку возможности применения дешевых аналогов используемых компонентов (гидроксида натрия и жидкого стекла). Наиболее вероятным компонентом, служащим для замены щелочного активатора, может выступать красный шлам [27], который представляет собой щелочной (рН 10–13) отход производства глинозема [26], богатый аморфными фазами кремнезема и глинозема. По этой причине красный шлам может использоваться как в качестве частичной замены активатора, так и в качестве прекурсоров для производства геополимеров [28].

Важным направлением возможных исследований стоит рассмотреть применение геополимерных бетонов для укрепления грунтов в строительной отрасли. Возможность достижения технического эффекта подтверждена результатами работ по стабилизации отходов добычи угля [16], укрепления песчаных грунтов [29] и строительных отходов [30]. А также актуально подробнее исследовать вопросы щелочно-силикатной коррозии геополимерных вяжущих.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Vigneshkumar A., Christy C.F., Muthukannan M., Maheswaran M., Arunkumar K., Devi R.K. Experimental investigations on fresh and mechanical properties of fly ash and ground granulated blast furnace slag self-compacting geopolymer concrete // *Materials Today: Proceedings*. 2024. DOI: 10.1016/j.matpr.2024.01.051
2. Yu J., Ji F., Lv Q., Li W., Lin Z., Peng Y. Mechanical property and microstructure of fly ash-based geopolymer by calcium activators // *Case Studies in Construction Materials*. 2024. Vol. 21. P. e03811. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03811
3. Ерошкина Н.А., Коровкин М.О., Тымчук Е.И. Структурообразование геополимеров // *Молодой ученый*. 2015. № 7 (87). С. 123–126. EDN TPPJVP.
4. Davidovits J. Geopolymers // *Journal of Thermal Analysis*. 1991. Vol. 37. Issue 8. Pp. 1633–1656. DOI: 10.1007/bf01912193
5. Singh N.B. Fly ash-based geopolymer binder: A future construction material // *Minerals*. 2018. Vol. 8. Issue 7. P. 299. DOI: 10.3390/min8070299
6. John S.K., Nadir Y., Girija K. Effect of source materials, additives on the mechanical properties and durability of fly ash and fly ash-slag geopolymer mortar : a review // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 280. P. 122443. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122443
7. Kaya M., Koksall F., Gencel O., Munir M.J., Kazmi S.M.S. Influence of micro Fe_2O_3 and MgO on

the physical and mechanical properties of the zeolite and kaolin based geopolymer mortar // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 52. P. 104443. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104443

8. Ma B., Luo Y., Zhou L., Shao Z., Liang R., Fu J. et al. The influence of calcium hydroxide on the performance of MK-based geopolymer // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 329. P. 127224. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127224

9. Liew Y.M., Heah C.Y., Mustafa A.B.M., Kamarudin H. Structure and properties of clay-based geopolymer cements : a review // *Progress in Materials Science*. 2016. Vol. 83. Pp. 595–629. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.08.002

10. Lekshmi S., Sudhakumar J. An assessment on the durability performance of fly ash-clay based geopolymer mortar containing clay enhanced with lime and GGBS // *Cleaner Materials*. 2022. Vol. 5. P. 100129. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100129

11. Tekin I. Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 127. Pp. 607–617. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.038

12. Liu M., Wang C., Wu H., Yang D., Ma Z. Reusing recycled powder as eco-friendly binder for sustainable GGBS-based geopolymer considering the effects of recycled powder type and replacement rate // *Journal*

of Cleaner Production. 2022. Vol. 364. P. 132656. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132656

13. Ерошкина Н.А., Коровкин М.О., Коровченко И.В. Технология получения геополимерного вяжущего на базе магматических горных пород // Молодой ученый. 2015. № 7 (87). С. 120–123. EDN TPPJVF.

14. Wu X., Shen Y., Hu L. Performance of geopolymer concrete activated by sodium silicate and silica fume activator // Case Studies in Construction Materials. 2022. Vol. 17. P. e01513. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01513

15. Petrus H.T.B.M., Fairuz F.I., Sa'dan N., Olvi-
anas M., Astuti W., Jenie S.N.A. et al. Green geopolymer cement with dry activator from geothermal sludge and sodium hydroxide // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 293. P. 126143. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126143

16. Qin Z., Yuan Y., Chen Z., Li Y., Xia Y. Combined preparation and application of geopolymer pavement materials from coal slurry-slag powder-fly ash mining solid waste: A case study // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 441. P. 137510. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137510

17. Pu S., Zhu Z., Wang W., Duan W., Wu Z., Li N. et al. Water resistance of fly ash phosphoric acid-based geopolymer // Developments in the Built Environment. 2022. Vol. 12. P. 100093. DOI: 10.1016/j.dibe.2022.100093

18. Adewuyi Y.G. Recent Advances in Fly-Ash-Based Geopolymers: Potential on the Utilization for Sustainable Environmental Remediation // ACS Omega. 2021. Vol. 6. Issue 24. Pp. 15532–15542. DOI: 10.1021/acsomega.1c00662

19. Ефремов А.Н., Хаустова В.В., Букина Д.Ю. Композиционные шлакощелочные вяжущие на основе гидроксида натрия, доменного граншлака и золошлаковых отходов тепловых электростанций // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2018. № 4–2 (132). С. 177–182. EDN YVCCPM.

20. San Nicolas R.V.R., Walkley B., van Deventer J.S.J. Fly ash-based geopolymer chemistry and behavior // Coal Combustion Products (CCP's). 2017. Pp. 185–214. DOI: 10.1016/b978-0-08-100945-1.00007-1

21. Ullah A., Kassim A., Ahmad S.A.R., Huang Y., Yunus N.Z.M., Zhu C. et al. Strength development of bottom ash based geopolymer and their application in columns to improve soft soil underneath embankment: Achieving sustainability in ground improvement //

Transportation Geotechnics. 2025. Vol. 50. P. 101463. DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101463

22. Wongpa J., Kiattikomol K., Jaturapitakkul C., Chindaprasirt P. Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete // Materials & Design. 2010. Vol. 31. Issue 10. Pp. 4748–4754. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.05.012

23. Diaz E.I., Allouche E.N., Eklund S. Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers // Fuel. 2010. Vol. 89. Issue 5. Pp. 992–996. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.09.012

24. Luo Z., Zhang B., Zou J., Luo B. Sulfate erosion resistance of slag-fly ash based geopolymer stabilized soft soil under semi-immersion condition // Case Studies in Construction Materials. 2022. Vol. 17. P. e01506. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01506

25. Du W., Ni L., Lv Y., Zheng D., Tang W., Cui H. Role of silica fume in the hydration evolution of fly ash-slag-based geopolymers // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 451. P. 138879. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138879

26. Xiaoshuang S., Yanpeng S., Jinqian L., Yuhao Z., Ruihan H. Preparation and performance optimization of fly ash-slag-red mud based geopolymer mortar: Simplex-centroid experimental design method // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 450. P. 138573. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138573

27. Qingke N., Haiqing Z., Haipeng Y., Xiangxin J., Rihua Z. Development and field test of Red mud-Fly Ash Geopolymer pile (RFP) // Cleaner Waste Systems. 2024. Vol. 9. P. 100184. DOI: 10.1016/j.clwas.2024.100184

28. Shi Y., Zhao Q., Xue C., Jia Y., Guo W., Zhang Y. et al. Preparation and curing method of red mud-calcium carbide slag synergistically activated fly ash-ground granulated blast furnace slag based eco-friendly geopolymer // Cement and Concrete Composites. 2023. Vol. 139. P. 104999. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.104999

29. Zhang J., Li B., Zhang M., Shan Z., Jin Q. Mechanical behavior and microstructure evolution of slag-fly ash based geopolymer stabilized sand // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 20. P. e03279. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03279

30. Doan T., Arulrajah A., Lin Y., Horpibulsuk S., Chu J., Darmawan S. Chemical stabilization of demolition wastes in pavement bases using one-part fly ash and slag based geopolymers // Transportation Geotechnics. 2024. Vol. 45. P. 101192. DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101192

Поступила в редакцию 20 февраля 2025 г.

Принята в доработанном виде 20 июля 2025 г.

Одобрена для публикации 20 июля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Александрович Лунёв — кандидат технических наук, директор центра компетенций в сфере использования вторичных материальных ресурсов в строительной отрасли; Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ); 644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5; SPIN-код: 2836-4151, Scopus: 57198893763, ResearcherID: AAZ-4755-2021, ORCID: 0000-0001-5857-1891; lunev.al.al@gmail.com;

Александр Викторович Явинский — преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства; **Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)**; 644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5; SPIN-код: 4276-7420, ResearcherID: OEO-0235-2025, ORCID: 0000-0003-1717-9302; 121qqz@mail.ru;

Сергей Валентинович Голиков — руководитель проектов; **Сибирская генерирующая компания (СГК)**; 630007, г. Новосибирск, ул. Свердлова, д. 7; GolikovSV@sibgenco.ru;

Петр Александрович Саньков — директор по реализации золошлаков; **Сибирская генерирующая компания (СГК)**; 630007, г. Новосибирск, ул. Свердлова, д. 7; SanykovPA@sibgenco.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Vigneshkumar A., Christy C.F., Muthukannan M., Maheswaran M., Arunkumar K., Devi R.K. Experimental investigations on fresh and mechanical properties of fly ash and ground granulated blast furnace slag self-compacting geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2024. DOI: 10.1016/j.matpr.2024.01.051
2. Yu J., Ji F., Lv Q., Li W., Lin Z., Peng Y. Mechanical property and microstructure of fly ash-based geopolymer by calcium activators. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 21:e03811. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03811
3. Eroshkina N.A., Korovkin M.O., Tymchuk E.I. Structure formation of geopolymers. *Young Scientist*. 2015; 7(87):123-126. EDN TPPJVP. (rus.).
4. Davidovits J. Geopolymers. *Journal of Thermal Analysis*. 1991; 37(8):1633-1656. DOI: 10.1007/bf01912193
5. Singh N.B. Fly ash-based geopolymer binder: A future construction material. *Minerals*. 2018; 8(7):299. DOI: 10.3390/min8070299
6. John S.K., Nadir Y., Girija K. Effect of source materials, additives on the mechanical properties and durability of fly ash and fly ash-slag geopolymer mortar : a review. *Construction and Building Materials*. 2021; 280:122443. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122443
7. Kaya M., Koksall F., Gencel O., Munir M.J., Kazmi S.M.S. Influence of micro Fe₂O₃ and MgO on the physical and mechanical properties of the zeolite and kaolin based geopolymer mortar. *Journal of Building Engineering*. 2022; 52:104443. DOI: 10.1016/j.job.2022.104443
8. Ma B., Luo Y., Zhou L., Shao Z., Liang R., Fu J. et al. The influence of calcium hydroxide on the performance of MK-based geopolymer. *Construction and Building Materials*. 2022; 329:127224. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127224
9. Liew Y.M., Heah C.Y., Mustafa A.B.M., Kamarudin H. Structure and properties of clay-based geopolymer cements : a review. *Progress in Materials Science*. 2016; 83:595-629. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.08.002
10. Lekshmi S., Sudhakumar J. An assessment on the durability performance of fly ash-clay based geopolymer mortar containing clay enhanced with lime and GGBS. *Cleaner Materials*. 2022; 5:100129. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100129
11. Tekin I. Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes. *Construction and Building Materials*. 2016; 127:607-617. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.038
12. Liu M., Wang C., Wu H., Yang D., Ma Z. Re-using recycled powder as eco-friendly binder for sustainable GGBS-based geopolymer considering the effects of recycled powder type and replacement rate. *Journal of Cleaner Production*. 2022; 364:132656. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132656
13. Korovchenko I.V., Korovkin M.O., Eroshkina N.A. Technology of geopolymer binder production on the basis of magmatic rocks. *Young Scientist*. 2015; 7(87):120-123. EDN TPPJVF. (rus.).
14. Wu X., Shen Y., Hu L. Performance of geopolymer concrete activated by sodium silicate and silica fume activator. *Case Studies in Construction Materials*. 2022; 17:e01513. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01513
15. Petrus H.T.B.M., Fairuz F.I., Sa'dan N., Olvi-anas M., Astuti W., Jenie S.N.A. et al. Green geopolymer cement with dry activator from geothermal sludge and sodium hydroxide. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 293:126143. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126143
16. Qin Z., Yuan Y., Chen Z., Li Y., Xia Y. Combined preparation and application of geopolymer pavement materials from coal slurry-slag powder-fly ash mining solid waste: A case study. *Construction and Building Materials*. 2024; 441:137510. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137510
17. Pu S., Zhu Z., Wang W., Duan W., Wu Z., Li N. et al. Water resistance of fly ash phosphoric acid-based geopolymer. *Developments in the Built Environment*. 2022; 12:100093. DOI: 10.1016/j.dibe.2022.100093
18. Adewuyi Y.G. Recent Advances in Fly-Ash-Based Geopolymers: Potential on the Utilization for Sustainable Environmental Remediation. *ACS Omega*. 2021; 6(24):15532-15542. DOI: 10.1021/acsomega.1c00662
19. Yefremov A., Haustova V., Bukina D. Composite slagalkaline binders based on sodium hydroxide, blastfurnace granulated slag and ashslag waste of thermal power plants. *Proceeding of the Donbas National*

Academy of Civil Engineering and Architecture. 2018; 4-2(132):177-182. EDN YVCCPM. (rus.).

20. San Nicolas R.V.R., Walkley B., van Deventer J.S.J. Fly ash-based geopolymer chemistry and behavior. *Coal Combustion Products (CCP's)*. 2017; 185-214. DOI: 10.1016/b978-0-08-100945-1.00007-1

21. Ullah A., Kassim A., Ahmad S.A.R., Huang Y., Yunus N.Z.M., Zhu C. et al. Strength development of bottom ash based geopolymer and their application in columns to improve soft soil underneath embankment: Achieving sustainability in ground improvement. *Transportation Geotechnics*. 2025; 50:101463. DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101463

22. Wongpa J., Kiattikomol K., Jaturapitakkul C., Chindaprasirt P. Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete. *Materials & Design*. 2010; 31(10):4748-4754. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.05.012

23. Diaz E.I., Allouche E.N., Eklund S. Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers. *Fuel*. 2010; 89(5):992-996. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.09.012

24. Luo Z., Zhang B., Zou J., Luo B. Sulfate erosion resistance of slag-fly ash based geopolymer stabilized soft soil under semi-immersion condition. *Case Studies in Construction Materials*. 2022; 17:e01506. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01506

25. Du W., Ni L., Lv Y., Zheng D., Tang W., Cui H. Role of silica fume in the hydration evolution of fly ash-

slag-based geopolymers. *Construction and Building Materials*. 2024; 451:138879. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138879

26. Xiaoshuang S., Yanpeng S., Jinqian L., Yuhao Z., Ruihan H. Preparation and performance optimization of fly ash- slag- red mud based geopolymer mortar: Simplex-centroid experimental design method. *Construction and Building Materials*. 2024; 450:138573. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138573

27. Qingke N., Haiqing Z., Haipeng Y., Xiangxin J., Rihua Z. Development and field test of Red mud-Fly Ash Geopolymer pile (RFP). *Cleaner Waste Systems*. 2024; 9:100184. DOI: 10.1016/j.clwas.2024.100184

28. Shi Y., Zhao Q., Xue C., Jia Y., Guo W., Zhang Y. et al. Preparation and curing method of red mud-calcium carbide slag synergistically activated fly ash-ground granulated blast furnace slag based eco-friendly geopolymer. *Cement and Concrete Composites*. 2023; 139:104999. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.104999

29. Zhang J., Li B., Zhang M., Shan Z., Jin Q. Mechanical behavior and microstructure evolution of slag-fly ash based geopolymer stabilized sand. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 20:e03279. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03279

30. Doan T., Arulrajah A., Lin Y., Horpibulsuk S., Chu J., Darmawan S. Chemical stabilization of demolition wastes in pavement bases using one-part fly ash and slag based geopolymers. *Transportation Geotechnics*. 2024; 45:101192. DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101192

Received February 20, 2025.

Adopted in revised form on July 20, 2025.

Approved for publication on July 20, 2025.

B I O N O T E S: **Aleksandr A. Lunev** — Candidate of Technical Sciences, Director of the Competence Center for the Use of Secondary Material Resources in the Construction Industry; **The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)**; 5 Mira avenue, Omsk, 644080, Russian Federation; SPIN-code: 2836-4151, Scopus: 57198893763, ResearcherID: AAZ-4755-2021, ORCID: 0000-0001-5857-1891; lunev.al.al@gmail.com;

Alexander V. Yavinskiy — lecturer at the Department of Industrial and Civil Engineering; **The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)**; 5 Mira avenue, Omsk, 644080, Russian Federation; SPIN-code: 4276-7420, ResearcherID: OEO-0235-2025, ORCID: 0000-0003-1717-9302; 121qqz@mail.ru;

Sergey V. Golikov — project manager; **Siberian Generating Company**; 7 Sverdlova st., Novosibirsk, 630007, Russian Federation; GolikovSV@sibgenco.ru;

Petr A. Sankov — Director for ash and slag sales; **Siberian Generating Company**; 7 Sverdlova st., Novosibirsk, 630007, Russian Federation; SanykovPA@sibgenco.ru.

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

The authors have no conflicts of interest to declare.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 620.3:666.9

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1565-1576

Влияние дисперсного армирования на макро- и микроструктуру сухих строительных смесей с применением активации

Владимир Александрович Перфилов, Дмитрий Александрович Ляшенко,
Максим Евгеньевич Николаев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время нашли широкое распространение сухие строительные смеси на базе гидравлических вяжущих материалов. Применение сухих смесей многогранно и связано в основном с приготовлением растворов и мелкозернистых бетонов. Указанные смеси получают путем регулирования реологических и физико-механических свойств за счет введения модифицирующих добавок и микронаполнителей в виде стеклянных микросфер.

Материалы и методы. Для регулирования свойств смеси на микроскопическом уровне использовались фибровые полимерные и базальтовые волокна, создавая тем самым упрочненную армированную микроструктуру затвердевшего мелкозернистого бетона. Подобраны составы сухих смесей на основе полимерных и базальтовых фибровых волокон с применением суперпластификатора и аппретированных полых стеклянных микросфер марки МС-ВП-А9 в количестве 10 %. Сухая смесь на базе указанного состава с использованием суперпластификаторов, стеклянных микросфер, а также базальтовой или полимерной фибры приготавливается путем перемешивания и измельчения в линейно-индукционном вращателе, который имеет показатель индуктивности переменного поля 0,2 Тл и частоту 50 Гц. Обработка смеси осуществляется в течение 240 с. Полимерные и базальтовые волокна вводились в сухую смесь раздельно, т.е. в каждом составе использовался только один из двух представленных видов волокон.

Результаты. Активированные в электромагнитном поле сухие смеси затворялись водой в количестве, необходимом для получения растворов равной подвижности. Приготовление раствора производилось в течение 4–5 мин, при этом полученные смеси имели повышенную пластичность и однородность с равным количеством воды затворения в сравнении с контрольными составами без применяемых базальтовых или полимерных волокон.

Выводы. Анализ экспериментальных данных показал, что оптимальная концентрация суперпластификатора составляет 0,5 % от массы цемента, при которой наблюдается максимальный прирост прочности. Установлено, что оптимальное количество фиброволокна (как базальтового, так и полипропиленового) — 1,4 кг/м³. При этом базальтовое волокно обеспечивает увеличение прочности при сжатии на 28 % и при изгибе на 45 %, а полипропиленовое — на 29 и 42 % соответственно.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фиброволокна, сухие строительные смеси, электромагнитная активация, стеклянные микросферы, суперпластификатор, мелкозернистый бетон

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Перфилов В.А., Ляшенко Д.А., Николаев М.Е. Влияние дисперсного армирования на макро- и микроструктуру сухих строительных смесей с применением активации // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 10. С. 1565–1576. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1565-1576

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Александрович Ляшенко, caf_ngs@mail.ru.

The effect of dispersed reinforcement on the macro- and microstructure of dry building mixes using activation

Vladimir A. Perfilov, Dmitry A. Lyashenko, Maksim E. Nikolaev
Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Dry building mixes based on hydraulic binders are currently widely used. The use of dry mixes is multifaceted and is mainly associated with the preparation of solutions and fine-grained concrete. These mixes are obtained by regulating rheological and physical-mechanical properties by introducing modifying additives and microfillers in the form of glass microspheres.

Materials and methods. Polymer and basalt fibre were used to regulate the properties of the mix at the microscopic level, thereby creating a strengthened reinforced microstructure of hardened fine-grained concrete. The compositions of dry mixes based on polymer and basalt fibre were selected using a superplasticizer and 10 % coated hollow glass microspheres of the MS-VP-A9 brand. A dry mix based on the specified composition with the use of superplasticizers, glass microspheres, and basalt or polymer fibre is prepared by mixing and grinding in a linear induction rotator, which has an alternating field inductance of 0.2 T and a frequency of 50 Hz. The mixture is processed for 240 seconds. Polymer and basalt fibres were introduced into the dry mix separately, i.e. only one of the two presented types of fibres was used in each composition.

Results. Dry mixes activated in an electromagnetic field were mixed with water in the amount necessary to obtain solutions of equal mobility. The solution was prepared for 4–5 minutes, while the resulting mixtures had increased plasticity and homogeneity with an equal amount of mixing water, in comparison with the control compositions, without the use of basalt or polymer fibres.

Conclusions. The influence of the type and quantity of fibre on the physical and mechanical properties of fine-grained concrete obtained on the basis of dry building mixtures activated by electromagnetic treatment was determined.

KEYWORDS: fibre, dry building mixes, electromagnetic activation, glass microspheres, superplasticizer, fine-grained concrete

FOR CITATION: Perfilov V.A., Lyashenko D.A., Nikolaev M.E. The effect of dispersed reinforcement on the macro- and microstructure of dry building mixes using activation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(10):1565-1576. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1565-1576 (rus.).

Corresponding author: Dmitry A. Lyashenko, caf_ngs@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Применение сухих строительных смесей для приготовления мелкозернистого бетона, используемого при производстве монолитных напольных покрытий, штукатурных растворов, а также тротуарной плитки, бордюрного камня, брусчатки и других мелкоштучных изделий, при эксплуатации сталкивается с проблемами устойчивости к усадочным трещинам, водо- и морозостойкости, повышения стойкости к механическим и химическим воздействиям [1–7]. В условиях современной промышленности и гражданского строительства актуальность приобретает создание материалов с улучшенными физико-механическими свойствами, способных выдерживать значительные нагрузки и воздействие различных агрессивных факторов.

Для улучшения физико-механических свойств мелкозернистого бетона необходимо модифицировать его структуру на макро- и микроскопическом уровнях, поскольку между ними существует тесная взаимосвязь [8–11]. Сухие строительные смеси становятся перспективным направлением развития строительной индустрии. Их применение позволяет получать материалы с заданными характеристиками, включая определенную подвижность, вододерживающую способность и отсутствие расслаиваемости. Особое внимание уделяется разработке составов с относительно малой плотностью, высокими показателями прочности и трещиностойкости.

Традиционные методы приготовления строительных смесей уже не удовлетворяют растущим требованиям строительной отрасли. Существующие технологии смешивания в различных аппаратах (барбанных, лопастных, центробежных) не обеспечивают энергоэффективности и качества активации компонентов. В связи с этим возникает потребность в разработке инновационных подходов к приготовлению строительных смесей.

Инновационные технологии приготовления сухих смесей открывают новые возможности для улучшения качества строительных материалов. Одним из перспективных направлений является применение электромагнитного воздействия на сухие компоненты растворов. Этот метод дает возможность значительно повысить реакционную способность

смеси и улучшить ее физико-механические характеристики.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания строительных материалов нового поколения, отвечающих современным требованиям строительной отрасли. Разработка оптимальных составов сухих смесей и совершенствование технологий их приготовления — важный шаг в развитии строительной индустрии.

В ходе теоретических и экспериментальных исследований установлено, что мелкозернистые бетоны с включением фиброволокна демонстрируют улучшение физико-механических свойств. Наряду с этим фиброволокна влияют на макроструктуру мелкозернистого бетона за счет перераспределения внутренних напряжений, укрепляя «зону контакта», соединяющую цементную матрицу и мелкий наполнитель [12–14]. В результате образуется макроструктура, пространственно-армированная фиброволокном, что повышает устойчивость мелкозернистого бетона к образованию и развитию трещин. Армирование мелкозернистого бетона дисперсными волокнами оказывает непосредственное влияние на его микроструктуру. Во время гидратации цементного камня гидросиликаты кальция концентрируются на поверхности фибры. Таким образом, снижается пористость при значительном уменьшении крупных капиллярных пор, повышается водо- и морозостойкость, а также прочность мелкозернистого бетона.

Можно выделить основные вопросы, касающиеся развития технологий сухих строительных смесей:

- разработка оптимальных составов сухих смесей;
- изучение влияния различных добавок на свойства материалов;
- исследование эффективности различного вида активации компонентов;
- определение основных физико-механических характеристик полученных материалов;
- оценка практической значимости разработанных составов.

Решение этих задач позволит создать новые материалы с улучшенными эксплуатационными характеристиками, отвечающие современным требованиям строительной отрасли.

Цель исследования — определение влияния различных типов фиброволокон на физико-механические характеристики бетонов, полученных из сухих строительных смесей с применением активации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для выявления влияния дисперсного армирования на макро- и микроструктуру мелкозернистого бетона использовано полипропиленовое фиброволокно ВСМ (волокно строительное микроармирующее) длиной 12 мм и диаметром 20 мкм с пределом прочности при растяжении до 500 МПа, произведенное компанией ООО «Си Айрлайд» по ТУ 2272-006-13429727–2007, а также базальтовое фиброволокно длиной 12 мм и диаметром 13 мкм с пределом прочности при растяжении до 2000 МПа, произведенное в соответствии с ТУ В В.2.7-26.8-32673353-001–2007. Преимущество полимерных и базальтовых волокон перед металлическими заключается в их малом весе, плотности, высокой коррозионной стойкости и прочности, а также относительно низкой стоимости. Они способствуют в процессе смешивания образованию реологически однородной, пластичной и неразделимой смеси. В ходе предыдущих исследований [12–14] было установлено, что на физико-механические параметры в наибольшей степени влияет количество вводимой фибры, которое варьируется в диапазоне от 0,6 до 2,0 кг/м³ бетонной смеси.

В состав смеси входили: портландцемент производства ОАО «Осколцемент» марки ЦЕМ I 42,5Н; кварцевый песок с модулем крупности частиц 1,97; суперпластификатор «Полипласт СП-3» в количестве 0,8 % от массы цемента; полые стеклянные микросферы марки МС-ВП-А9 10 % по отношению к кварцевому песку; полимерные и базальтовые волокна от 0,6 до 2,0 кг/м³ бетонной смеси.

В настоящее время существуют схемы приготовления строительных, в том числе сухих строительных, смесей с использованием механоактивации, а также с применением ультразвука, вибрации, магнитной индукции и других [15–21] методов химической активации [4, 5, 10, 11, 22–24].

В целях изучения основных физико-механических свойств бетона на основе сухой строительной смеси проведены исследования влияния базальтового и полипропиленового дисперсно-армирующего волокна на структуру бетонной матрицы. В ходе теоретических и экспериментальных исследований было определено, что введение данных видов фиброволокон способствует увеличению прочности бетона. Применение фиброволокна способствует возможности получения нерасслаиваемой и реологически однородной смеси на стадии перемешивания. В ходе твердения бетона образуется пространственно-армированная микроструктура, благодаря чему повышается способность бетона сопротивляться про-

цессам трещинообразования как при усадке, так и при эксплуатации.

Технология приготовления сухой цементно-песчаной смеси состава Ц:П = 1:3 с совместным применением суперпластификатора, стеклянных микросфер, полимерных или базальтовых волокон включала обработку в линейном индукционном вращателе (ЛИВ) с индуктивностью переменного поля 0,2 Тл и частотой 50 Гц. В камере ЛИВ смесь перемешивалась и измельчалась. Продолжительность диспергации за счет электромеханических сил, воздействующих на мелющие тела в виде ферромагнитных металлических отрезков, происходила в течение 240 с. Полимерные и базальтовые волокна вводились в сухую смесь отдельно, т.е. в каждой композиции использовался только один из двух представленных типов волокон. Таким образом, в камеру ЛИВ погружали сухие компоненты смеси, фиброволокна и расчетное количество мелющих тел. Сухие смеси, обработанные в электромагнитном поле, смешивали с водой в количестве, необходимом для получения растворов равной подвижности. Время приготовления растворов составляло 4–5 мин, в течение которого увеличивались показатели пластичности и однородности раствора при неизменном количестве воды затворения по сравнению с контрольными составами без применения базальтового или полимерного фиброволокна.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе исследований для оценки влияния введения фиброволокна на основные эксплуатационные свойства мелкозернистого бетона на базе сухих строительных смесей с помощью электромагнитной обработки подготовлены образцы размером 40 × 40 × 160 мм. Результаты испытаний мелкозернистого бетона, приготовленного из активированных сухих смесей, представлены в табл. 1 и на рис. 1. При обработке полученных лабораторных данных было определено, что мелкозернистый бетон, полученный на основе сухих смесей с использованием полимерного и базальтового фиброволокна, имел повышенные прочностные характеристики.

На первом этапе проводились исследования, направленные на определение оптимальной концентрации суперпластифицирующей добавки «Полипласт СП-3». Для исследования изготовлены образцы со следующим количеством добавки суперпластификатора: 0,25; 0,5; 0,75; 1 % по массе вяжущего. Результаты исследований приведены в табл. 1. В процессе проведенных исследований определена наиболее оптимальная концентрация суперпластификатора СП-3, которая составила 0,5 % по массе цемента.

Введение 0,5 % СП-3 по массе цемента положительно влияет на эксплуатационные свойства фибробетона. Так, при сравнении с контрольными образцами без применения указанной добавки при-

Табл. 1. Влияние добавки СП-3 на свойства бетона

Table 1. The influence of SP-3 additive on the properties of concrete

Номер состава Composition Number	Количество добавки СП-3, % по массе цемента Quantity of additive SP-3, % by weight of cement	Расплыв конуса, мм Cone spread, mm	Прочность, МПа Strength, MPa	
			Изгиб Bend	Сжатие Compression
1	0	108	2,8	44,86
2	0,25	107	4,2	50,02
3	0,5	109	5,9	60,45
4	0,75	108	4,5	61,01
5	1,0	109	5,8	59,14

рост прочности при сжатии составил 47 %, а прочность при растяжении на изгиб увеличилась почти в 2 раза.

При дальнейшем увеличении пластифицирующей добавки наблюдается снижение прочности, а также повышается стоимость фибробетона.

На втором этапе рассматривалось влияние различных концентраций фиброволокна на прочностные характеристики бетона (табл. 2).

При изучении полученных экспериментальных данных установлено, что оптимальным количеством фиброволокна для бетона с применением как базальтовой, так и полипропиленовой фибры является 1,4 кг/м³. При дальнейшем увеличении количества фиброволокна в составе бетона отмечается образо-

вание комков и, как следствие, снижается прочность такого фибробетона. Помимо этого, увеличивается его стоимость.

Из полученных сведений видно, что при использовании базальтового фиброволокна в мелкозернистом бетоне наибольшая прочность при сжатии была у состава 6 с расходом 1,4 кг/м³. Увеличение прочности по сравнению с контрольными образцами составило 28 %, в то время как на изгиб — 45 %. При этом плотность образцов практически не изменялась (увеличение на 3 %). При применении полипропиленового фиброволокна максимальное увеличение прочности наблюдалось при введении добавки 1,2 кг/м³. Максимальное увеличение прочности при сжатии составило 29 %, при изгибе 42 %,

Табл. 2. Влияние применяемых стеклянных микросфер, пластификаторов, фиброволокна и магнитной обработки сухой смеси на свойства мелкозернистого бетона

Table 2. The effect of applied glass microspheres, superplasticizer, fibre fillers and magnetic treatment of dry mix on the properties of fine-grained concretes

Номер Number	Расход фибры, кг/м³ Cosumption of fibre filler, kg/m³	Полипропиленовое фиброволокно Filler based on polymer fibres		Базальтовое фиброволокно Filler based on basalt fibres	
		Прочность мелкозернистого бетона, МПа Strength of fine-grained concrete, MPa		Прочность мелкозернистого бетона, МПа Strength of fine-grained concrete, MPa	
		Изгиб Bending	Сжатие Compression	Изгиб Bending	Сжатие Compression
1	0	7,3	56,81	7,3	56,81
2	0,6	7,5	57,45	7,8	58,20
3	0,8	7,7	61,82	8,5	64,33
4	1,0	8,2	66,45	8,8	68,52
5	1,2	10,4	73,33	9,3	70,57
6	1,4	9,6	68,23	10,6	72,72
7	1,6	9,4	70,52	9,1	68,15
8	1,8	9,7	69,19	9,6	69,43
9	2,0	9,3	69,45	9,8	70,64

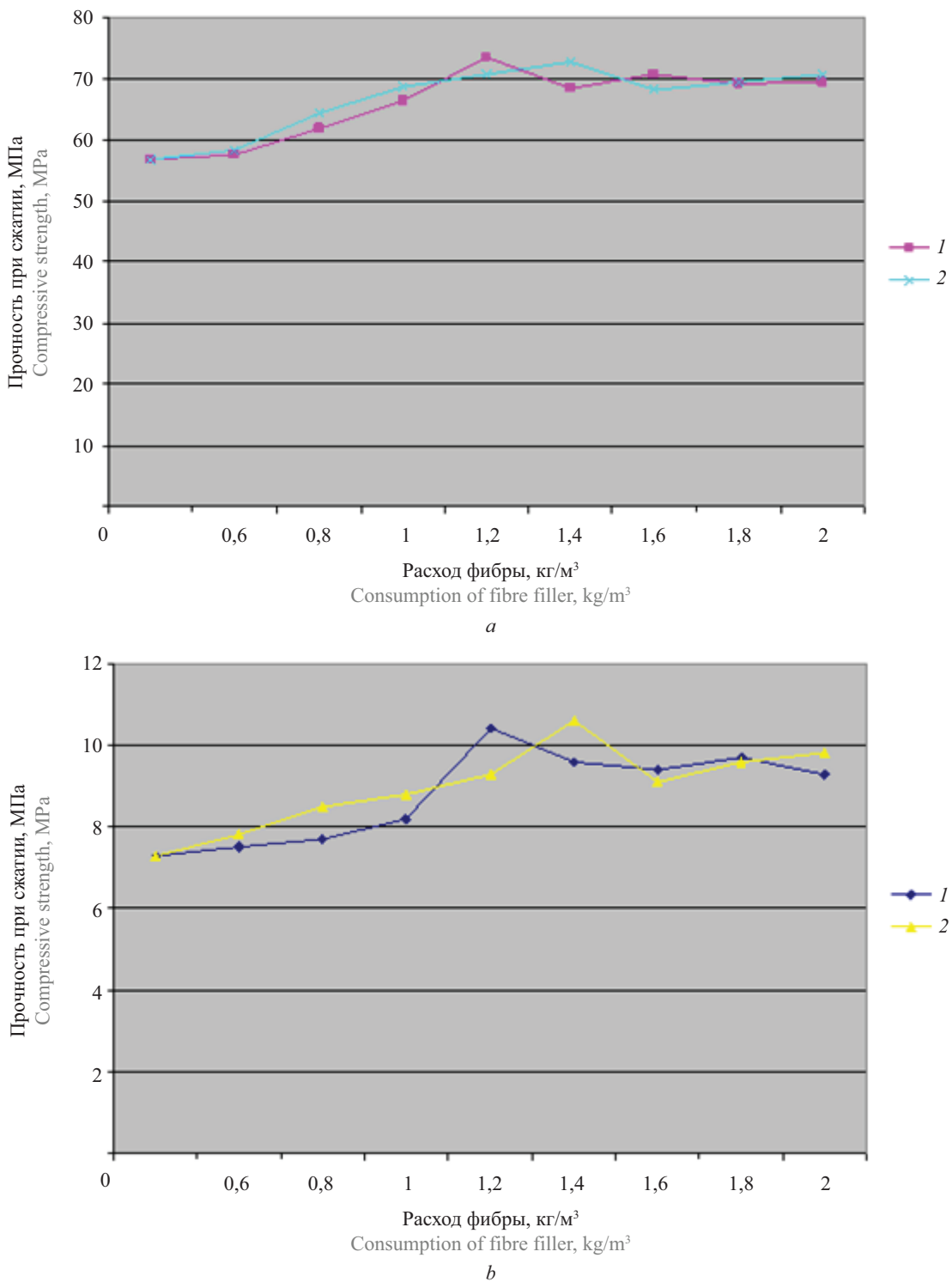
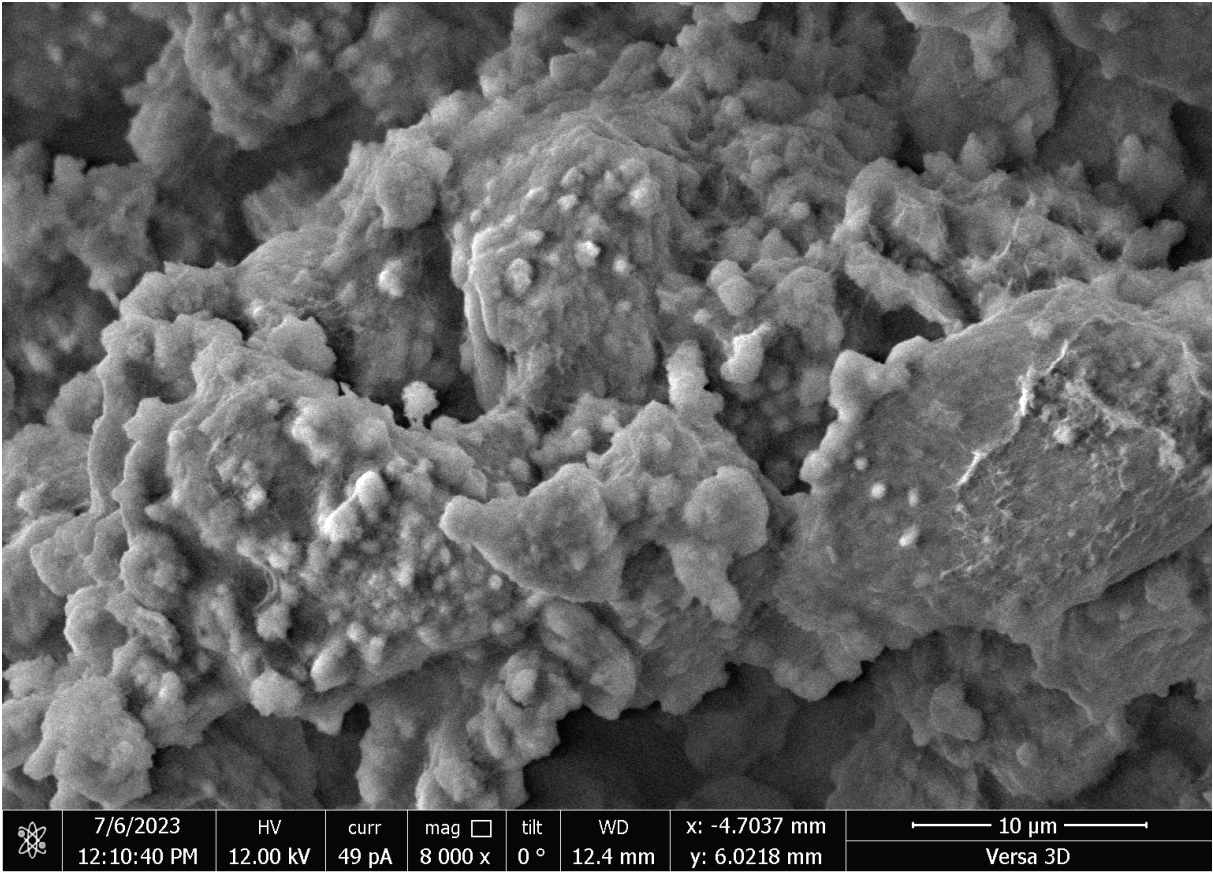


Рис. 1. Влияние расхода фибрового волокна, стеклянных микросфер и суперпластификатора на изменение прочности мелкозернистого бетона: 1 — полипропиленовая фибра; 2 — базальтовая фибра

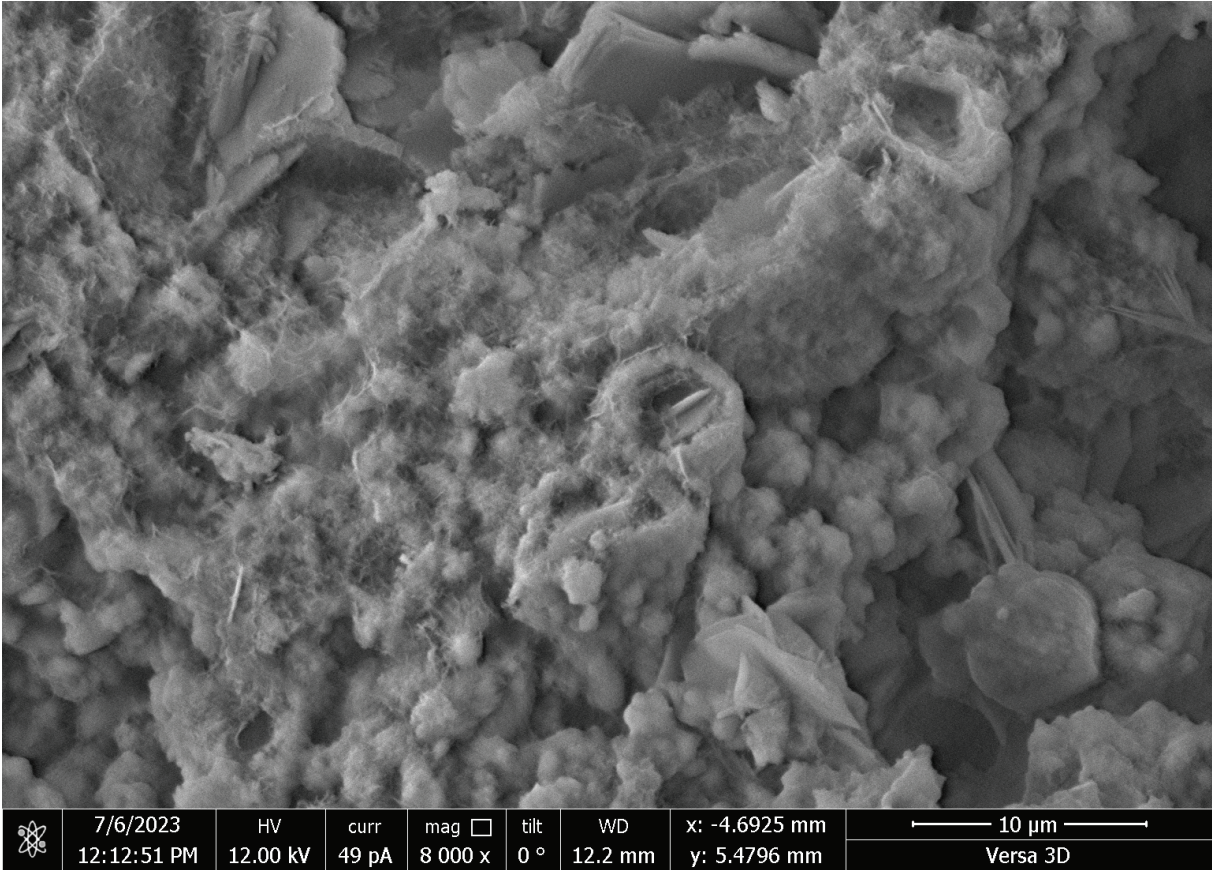
Fig. 1. The effect of the consumption of fibre fillers, glass microspheres and superplasticizer on the change in the strength of fine-grained concrete: 1 — polymer fibre filler; 2 — basalt fibre filler

при этом отмечалось уменьшение плотности на 2 %. При дальнейшем увеличении расхода полимерных и базальтовых волокон прочностные характеристики несколько снижаются (рис. 1), что может быть связано с образованием большего количества агломератов волокон и увеличением неоднородности смеси.

Увеличение прочности полученных образцов можно объяснить тем, что комплексное введение в сухую строительную смесь пластифицирующей добавки, полых стеклянных микросфер и фиброволокна улучшает сцепление при образовании цементно-песчаной матрицы. Это позволяет повы-



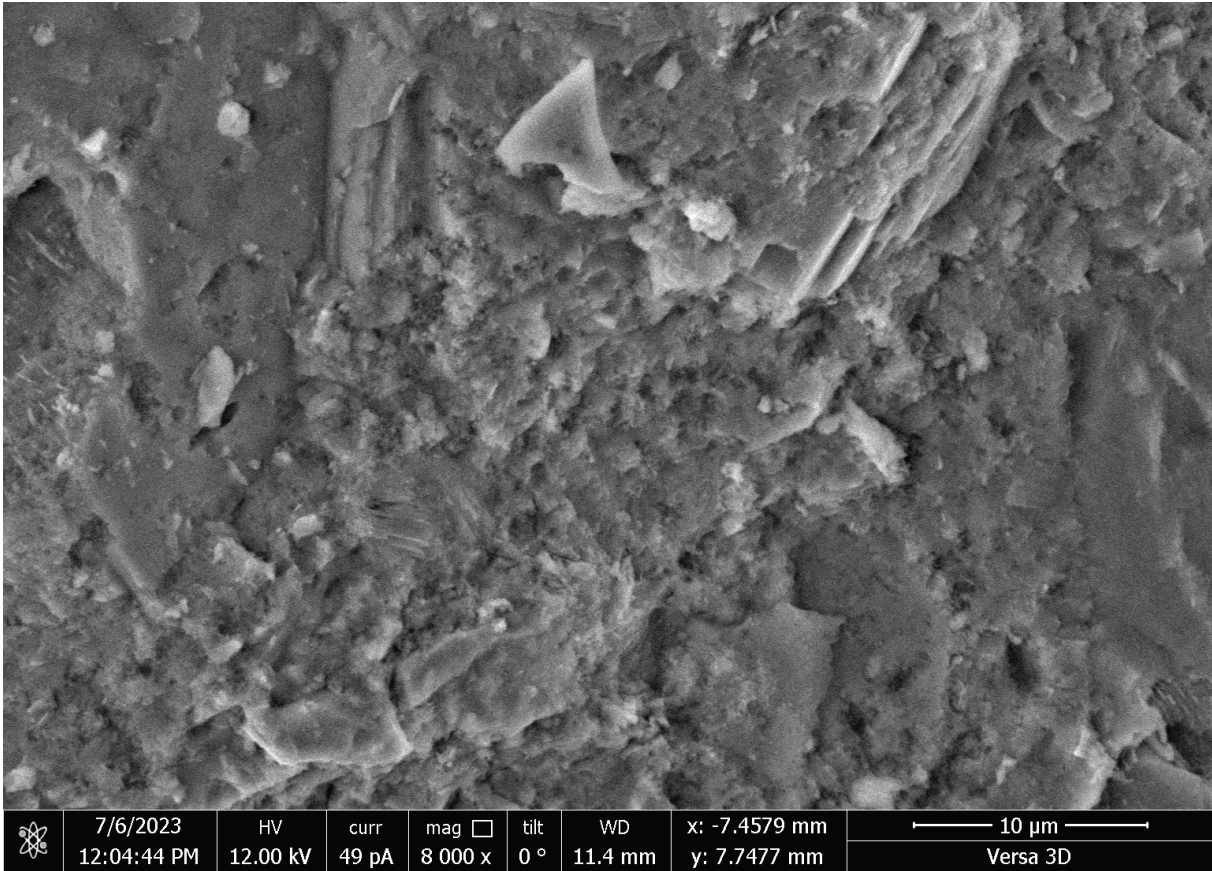
a



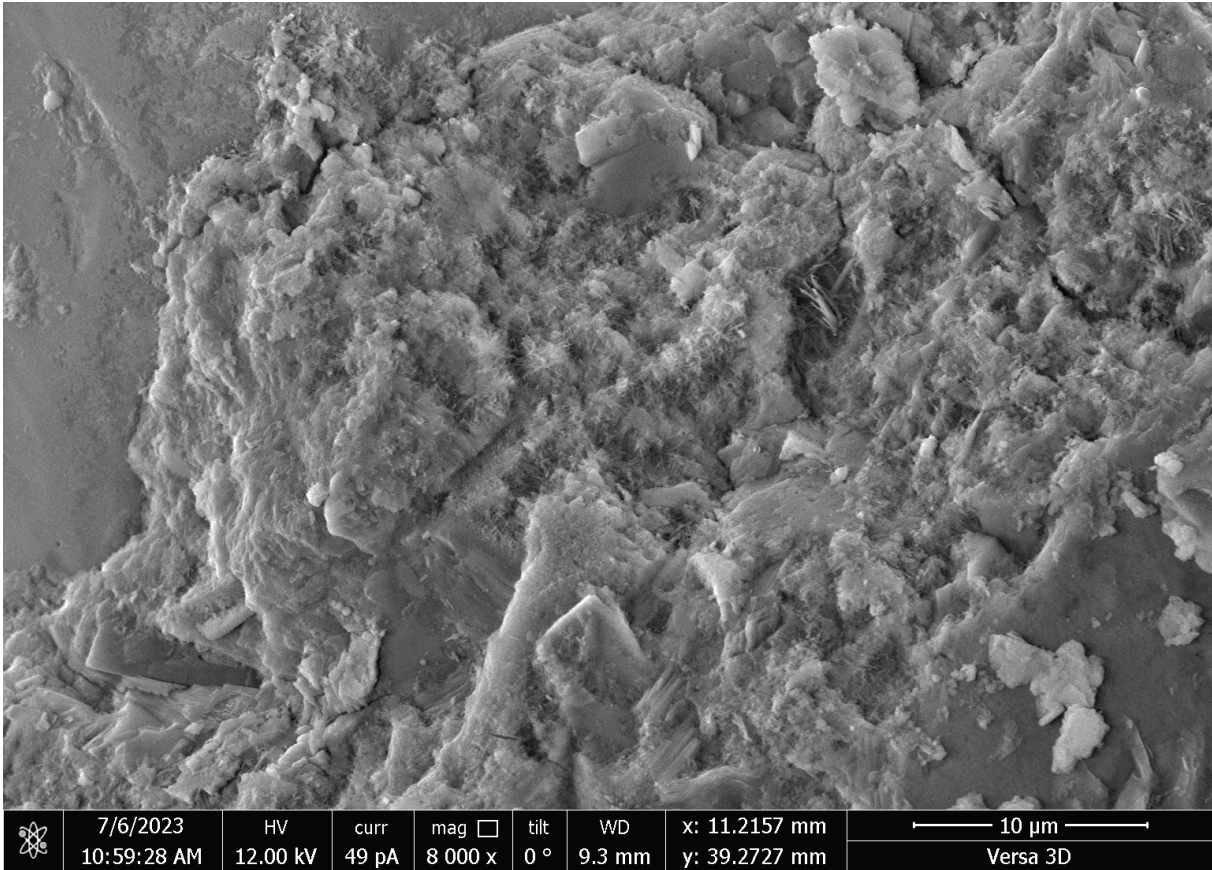
b

Рис. 2. Микрофотография бетона, изготовленного на основе цемента без механоактивации

Fig. 2. Microphotograph of concrete made from cement without mechanical



a



b

Рис. 3. Микрофотография бетона из активированного цемента

Fig. 3. Micrograph of concrete made from activated cement

ситель трещиностойкость и, как следствие, долговечность. Данное увеличение достигается за счет релаксирующего воздействия фиброволокна, что снижает контактное напряжение между образовавшейся цементной матрицей с включением наполнителя. Исходя из этого, время разрушения бетонов с применением фиброволокна существенно увеличивается в сравнении с традиционными мелкозернистыми бетонами. Благодаря указанным свойствам можно значительно снизить трудозатраты, связанные с арматурными работами в железобетонных конструкциях, и увеличить производительность работ. За счет увеличения прочностных показателей, а также трещиностойкости возможно уменьшить сечение конструкций, выполненных из указанных бетонов. Главным недостатком применения фиброволокна служит затруднение при введении и перемешивании добавки, так как фибра склонна к образованию агломератов. Кроме того, требуется дополнительное повышение пластичности смеси, что достигается применением пластификаторов, благодаря которым при сохранении водоцементного отношения можно добиться повышения указанных характеристик с учетом сохранения заданной прочности.

Произведено исследование образцов с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) при кратности увеличения до 40 000. Для исследования отбирались образцы бетонов, прошедшие испытания на прочность. Бетон без применения механоактивации обладает более рыхлой структурой, что свидетельствует о большей пористости материала. Таким образом, бетон, изготовленный на основе механоактивированного вяжущего, имеет более плотную, мелкокристаллическую структуру, что является одной из причин повышения прочности бетона (рис. 2, 3).

На рис. 2, 3 можно наблюдать структуру исследуемых бетонов. Из рис. 2 видна структура контрольного образца бетона из сухой строительной смеси. На рис. 3 показаны образцы с включением различных видов фибр, а также с применением механической активации.

При сравнении механоактивированного цемента с контрольным образцом можно сделать вывод о том, что полученный бетон имеет более плотное и однородное распределение частиц компонентов. Наполнитель охвачен однородным слоем цементного камня. Механическая активация увеличивает удельную поверхность частиц цементно-песчаной смеси, что положительно влияет на компоновку частиц в смеси. Образцы без применения механоактивации имели более рыхлую структуру, следовательно, пористость такого материала больше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе экспериментальных и теоретических исследований определено положительное влияние введения базальтового и полипропиленового фибро-

волокна, характеризующееся высокими эксплуатационными характеристиками фибробетона. Так, выявлена оптимальная концентрация суперпластификатора «Полипласт СП-3», которая составила 0,5 % от массы цемента. При этой дозировке наблюдается максимальный прирост прочности: прирост прочностей при сжатии составил 47 %, а при изгибе почти в 2 раза. Оптимальное количество фиброволокна для обоих типов (базальтового и полипропиленового) составило 1,4 кг/м³. При этом базальтовое волокно обеспечивает увеличение прочности при сжатии на 28 % и при изгибе на 45 %. Введение полипропиленового волокна увеличило прочность при сжатии на 29 % и при изгибе на 42 %.

Применение СЭМ позволило оценить структурные изменения бетона, полученного при использовании механоактивации. Так, в бетонах на основе активированного вяжущего формируется более плотная и однородная структура, улучшается распределение частиц, благодаря чему снижается пористость материала и повышается его однородность.

Проведенные исследования подтвердили эффективность использования фибровых волокон в составе мелкозернистого бетона. Выявлено положительное влияние механоактивации на структуру и свойства материала. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых строительных материалов на основе комплексного применения механической активации бетонной смеси и введении фиброволокна, что даст возможность получать фибробетон с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Преимущество предварительной электромагнитной обработки составов сухих строительных смесей с использованием суперпластификатора, стеклянных микросфер и фибры по сравнению с составами, приготовленными по традиционной технологии (обычное перемешивание), заключается в увеличении прочности на изгиб в 2,7 раза, а на сжатие — на 76,2 % (см. композицию 6 на базальтовом волокне (табл. 1)) по отношению к составу, который не подвергался электромагнитной обработке. Экспериментально подтверждено, что введение фиброволокна (как полимерного, так и базальтового) в состав мелкозернистого бетона существенно улучшает его физико-механические характеристики.

При дозировке фибры от 0,6 до 1,2 кг/м³ значительно увеличивается прочность на растяжение при изгибе и прочность при сжатии. Электромагнитная механическая активация сухих строительных смесей в камере ЛИВ дополнительно усиливает положительный эффект введения фиброволокна, что подтверждается повышением прочностных характеристик. Таким образом, комбинированное использование механической активации и микроармирующих волокон совместно с применением

стеклянных микросфер является эффективным способом улучшения свойств мелкозернистого бетона.

Экспериментально определено, что для увеличения подвижности фибробетонов рекомендуется комплексное введение совместно с пластифицирующей добавкой. Установлена оптимальная концентрация суперпластификатора «Полипласт СП-3», равная 0,5 % по массе цемента. Дальнейшее увеличение количе-

ства пластификатора снижает прочностные характеристики бетона. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности разработанной технологии производства мелкозернистого бетона с использованием механоактивации и фиброволокна. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию технологических параметров процесса и расширение ассортимента применяемых материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kanaan D.M., Soliman A.M. Fresh and Mechanical Properties of One-Part Alkali-Activated Self-Consolidating Concrete // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Pp. 17–30. DOI: 10.1007/978-981-19-0507-0_3
2. Tekle B.H., Holschemacher K., Löber P., Heiden B. Mechanical Behavior and Frost-Resistance of Alkali-Activated Cement Concrete with Blended Binder at Ambient Curing Condition // *Buildings*. 2021. Vol. 11. Issue 2. P. 52. DOI: 10.3390/buildings11020052
3. Winnefeld F., Gluth G.J. G., Bernal S.A., Bignozzi M.C., Carabba L., Chithiraputhiran S. et al. RILEM TC 247-DTA round robin test: sulfate resistance, alkali-silica reaction and freeze-thaw resistance of alkali-activated concretes // *Materials and Structures*. 2020. Vol. 53. P. 140. DOI: 10.1617/s11527-020-01562-0
4. Xie T., Visintin P., Zhao X., Gravina R. Mix design and mechanical properties of geopolymer and alkali activated concrete: Review of the state-of-the-art and the development of a new unified approach // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 256. P. 119380. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119380
5. Coppola L., Coffetti D., Crotti E., Gazzaniga G., Pastore T. The Durability of One-Part Alkali-Activated Slag-Based Mortars in Different Environments // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Issue 9. P. 3561. DOI: 10.3390/su12093561
6. Goma'a E., Simon P.S., Kashosi C., El Gawaydy M. Mechanical Properties of High Early Strength Class C Fly Ash-Based Alkali Activated Concrete // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2020. Vol. 2674. Issue 2. Pp. 430–443. DOI: 10.1177/0361198120915892
7. Alanazi H., Hu J., Kim Y.R. Effect of slag, silica fume, and metakaolin on properties and performance of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 197. Pp. 747–756. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.172
8. Хохряков О.В. Композиционные цементы низкой водопотребности. Возможности и перспективы применения в строительных материалах // *Строительные материалы*. 2022. № 1–2. С. 123–133. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-123-133. EDN KCHDGH.
9. Самченко С.В., Егоров Е.С. Влияние ультрадисперсной добавки из предварительно гидратированного цемента на свойства цементной пасты // *Техника и технология силикатов*. 2019. Т. 26. № 2. С. 52–57. EDN DAQXRC.
10. Erofeev V., Vatin N., Maksimova I., Tarakanov O., Sanyagina Y., Erofeeva I. et al. Powder-activated concrete with a granular surface texture // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. Vol. 18. Issue 4. Pp. 49–61. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-4-49-61
11. Dudar I., Bondar A., Moroz D. Study of the influence of polymer additives on the properties of dried dry building mixtures // *Modern technology materials and design in construction*. 2023. Vol. 33. Issue 2. Pp. 12–18. DOI: 10.31649/2311-1429-2022-2-12-18
12. Perfilov V.A., Gabova V.V. Nano Modified Foam-Fiber-Concrete Mixture // *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 284. Pp. 1036–1041. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.284.1036
13. Perfilov V.A., Gabova V.V. Nanomodified constructional fiber-reinforced concrete // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 129. P. 05021. DOI: 10.1051/mateconf/201712905021
14. Перфилов В.А. Мелкозернистые фибробетоны : монография. Волгоград : ВолГАСУ, 2015. 127 с. EDN VZQUYD.
15. Пименов С.И., Ибрагимов Р.А. Влияние минералогического состава цемента при его активации на физико-технические свойства тяжелого бетона // *Строительные материалы*. 2017. № 8. С. 64–67. EDN ZFTRYJ.
16. Самченко С.В., Абрамов М.А., Османов А.Б. Анализ изменения характеристик активированного цемента с использованием дезинтеграторной технологии // *Строительные материалы*. 2022. № 11. С. 32–36. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-808-11-32-36. EDN PFDWBY.
17. Samchenko S., Kozlova I., Zemskova O., Baskakova E. Increase of aggregative and sedimentation stability of slag suspensions by ultrasound // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 110. P. 01061. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001061
18. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Kayumov R.A., Deberdeev T.R., Leksin V.V., Sprince A. Efficiency of activation of mineral binders in vortex-layer devices // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 6 (82). Pp. 191–198. DOI: 10.18720/MCE.82.17. EDN YZNVED.

19. Cheng S., Ge K., Sun T., Shui Z., Chen X., Lu J.X. Pozzolanic activity of mechanochemically and thermally activated coal-series kaolin in cement-based materials // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 299. P. 123972. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123972

20. Kriskova L., Pontikes Y., Zhang F., Cizer Ö., Jones P.T., Balen K.V. et al. Influence of mechanical and chemical activation on the hydraulic properties of gamma dicalcium silicate // *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 55. Pp. 59–68. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.10.004

21. Пустовгар А.П., Перфилов В.А., Ляшенко Д.А. Активированная сухая смесь для приготовления растворов и мелкозернистых бетонов // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 12 (108). С. 317–325. EDN RYIRBT.

22. Калабина Д.А., Яковлев Г.И., Дрохитка Р., Грахов В.П., Первушин Г.Н., Баженов К.А. и др. Реологическая активация фторангидридных композиций эфирами поликарбоксилата // *Строительные материалы*. 2020. № 1–2. С. 38–47. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-38-47. EDN MCDAMX.

23. Luukkonen T., Yliniemi J., Abdollahnejad Z. Alkali-activated dry-mix concretes // *Handbook of Advances in Alkali-Activated Concrete*. 2022. Pp. 67–68. DOI: 10.1016/b978-0-323-85469-6.00008-8 2022

24. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Ставцева А.В., Колодежная Е.В., Дергунов С.А., Сериков С.В. Моделирование структурных преобразований при измельчении композиционного цемента // *Строительные материалы*. 2021. № 11. С. 41–46. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-797-11-41-46. EDN DSZFNy.

Поступила в редакцию 21 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 12 августа 2025 г.

Одобрена для публикации 12 августа 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владимир Александрович Перфилов** — доктор технических наук, профессор кафедры нефтегазовых сооружений, Институт архитектуры и строительства; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 40074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 406728, Scopus: 56966537200, ORCID: 0009-0002-6688-0293; vladimirperfilov@mail.ru;

Дмитрий Александрович Ляшенко — аспирант кафедры нефтегазовых сооружений, Институт архитектуры и строительства; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 40074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 1054316, Scopus: 59523182400, ORCID: 0009-0002-6688-0293; dmitiry.lyashenko@yandex.ru;

Максим Евгеньевич Николаев — кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых сооружений, Институт архитектуры и строительства; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 40074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 935434, Scopus: 59523182400, ResearcherID: MIT-0092-2025, ORCID: 0000-0003-2956-4064; mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru.

Вклад авторов:

Перфилов В.А. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

Ляшенко Д.А. — написание исходного текста, итоговые выводы, оформление статьи.

Николаев М.Е. — написание исходного текста, итоговые выводы, оформление статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kanaan D.M., Soliman A.M. Fresh and Mechanical Properties of One-Part Alkali-Activated Self-Consolidating Concrete. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 17-30. DOI: 10.1007/978-981-19-0507-0_3

2. Tekle B.H., Holschemacher K., Löber P., Heiden B. Mechanical Behavior and Frost-Resistance of Alkali-Activated Cement Concrete with Blended Binder at Ambient Curing Condition. *Buildings*. 2021; 11(2):52. DOI: 10.3390/buildings11020052

3. Winnefeld F., Gluth G.J.G., Bernal S.A., Bignoz M.C., Carabba L., Chithiraputhiran S. et al. RILEM TC 247-DTA round robin test: sulfate resistance, alkali-silica reaction and freeze-thaw resistance of alkali-activated concretes. *Materials and Structures*. 2020; 53:140. DOI: 10.1617/s11527-020-01562-0

4. Xie T., Visintin P., Zhao X., Gravina R. Mix design and mechanical properties of geopolymer and alkali activated concrete: Review of the state-of-the-art and the development of a new unified approach. *Construction and Building Materials*. 2020; 256:119380. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119380

5. Coppola L., Coffetti D., Crotti E., Gazzaniga G., Pastore T. The Durability of One-Part Alkali-Activated Slag-Based Mortars in Different Environments. *Sustainability*. 2020; 12(9):3561. DOI: 10.3390/su12093561

6. Gomaa E., Simon P.S., Kashosi C., El Gwady M. Mechanical Properties of High Early Strength Class C Fly Ash-Based Alkali Activated Concrete. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2021; 2743:1–10. DOI: 10.1177/0361198121101111

tation Research Board. 2020; 2674(2):430-443. DOI: 10.1177/0361198120915892

7. Alanazi H., Hu J., Kim Y.R. Effect of slag, silica fume, and metakaolin on properties and performance of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*. 2019; 197:747-756. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.172

8. Khokhryakov O.V. Composite cements of low water demand. Possibilities and prospects of application in building materials. *Construction Materials*. 2022; 1-2:123-133. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-123-133. EDN KCHDGH. (rus.).

9. Samchenko S.V., Egorov E.S. Effect of ultra-dispersed additive from preliminary hydrated cement on the properties of cement paste. *Technique and Technology of Silicates*. 2019; 26(2):52-57. EDN DAQXRC. (rus.).

10. Erofeev V., Vatin N., Maksimova I., Tarakanov O., Sanyagina Y., Erofeeva I. et al. Powder-activated concrete with a granular surface texture. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022; 18(4):49-61. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-4-49-61

11. Dudar I., Bondar A., Moroz D. Study of the influence of polymer additives on the properties of dried dry building mixtures. *Modern technology materials and design in construction*. 2023; 33(2):12-18. DOI: 10.31649/2311-1429-2022-2-12-18

12. Perfilov V.A., Gabova V.V. Nano Modified Foam-Fiber-Concrete Mixture. *Solid State Phenomena*. 2018; 284:1036-1041. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.284.1036

13. Perfilov V.A., Gabova V.V. Nanomodified constructional fiber-reinforced concrete. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 129:05021. DOI: 10.1051/mateconf/201712905021

14. Perfilov V.A. *Fine-grained fiber-reinforced concrete : monograph*. Volgograd, VolgGASU, 2015; 126. EDN VZQUYD. (rus.).

15. Pimenov S.I., Ibragimov R.A. Influence of mineralogical composition of cement when activating it on physical-technical properties of heavy concrete. *Construction Materials*. 2017; 8:64-67. EDN ZFTRYJ. (rus.).

16. Samchenko S.V., Abramov M.A., Osmanov A.B. Analysis of changes in the characteristics of activated

cement using disintegrator technology. *Construction Materials*. 2022; 11:32-36. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-808-11-32-36. EDN PFDWBY. (rus.).

17. Samchenko S., Kozlova I., Zemskova O., Baskakova E. Increase of aggregative and sedimentation stability of slag suspensions by ultrasound. *E3S Web of Conferences*. 2019; 110:01061. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001061

18. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Kayumov R.A., Deberdeev T.R., Leksin V.V., Sprince A. Efficiency of activation of mineral binders in vortex-layer devices. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 6(82):191-198. DOI: 10.18720/MCE.82.17. EDN YZNVED.

19. Cheng S., Ge K., Sun T., Shui Z., Chen X., Lu J.X. Pozzolanic activity of mechanochemically and thermally activated coal-series kaolin in cement-based materials. *Construction and Building Materials*. 2021; 299:123972. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123972

20. Kriskova L., Pontikes Y., Zhang F., Cizer Ö., Jones P.T., Balen K.V. et al. Influence of mechanical and chemical activation on the hydraulic properties of gamma dicalcium silicate. *Cement and Concrete Research*. 2014; 55:59-68. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.10.004

21. Pustovgar A.P., Perfilov V.A., Lyashenko D.A. Activated dry mix for the preparation of mortars and fine-grained concrete. *Engineering journal of Don*. 2023; 12(108):317-325. EDN RYIRBT. (rus.).

22. Kalabina D.A., Yakovlev G.I., Drochitka R., Grakhov V.P., Pervushin G.N., Bazhenov K.A. et al. Rheological activation of fluoroanhydrite compositions with polycarboxylate esters. *Construction Materials*. 2020; 1-2:38-47. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-38-47. EDN MCDAMX. (rus.).

23. Luukkonen T., Yliniemi J., Abdollahnejad Z. Alkali-activated dry-mix concretes. *Handbook of Advances in Alkali-Activated Concrete*. 2022; 67-68. DOI: 10.1016/b978-0-323-85469-6.00008-8 2022

24. Garkavi M.S., Artamonov A.V., Stavtseva A.V., Kolodezhnaya E.V., Dergunov S.A., Serikov S.V. Modeling of structural transformations when grinding composite cement. *Construction Materials*. 2021; 11:41-46. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-797-11-41-46. EDN DSZFNy. (rus.).

Received March 21, 2025.

Adopted in revised form on August 12, 2025.

Approved for publication on August 12, 2025.

B I O N O T E S: **Vladimir A. Perfilov** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Oil and Gas Structures, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 40074, Russian Federation; ID RSCI: 406728, Scopus: 56966537200, ORCID: 0009-0002-6688-0293; vladimirperfilov@mail.ru;

Dmitry A. Lyashenko — postgraduate student of the Department of Oil and Gas Structures, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 40074, Russian Federation; ID RSCI: 1054316, Scopus: 59523182400, ORCID: 0009-0002-6688-0293; dmitry.lyashenko@yandex.ru;

Maksim E. Nikolaev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Structures, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 40074, Russian Federation; ID RSCI: 935434, Scopus: 59523182400, ResearcherID: MIT-0092-2025, ORCID: 0000-0003-2956-4064; mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru.

Contribution of the author:

Vladimir A. Perfilov — scientific supervision, research concept, development of methodology, writing the original text, final conclusions.

Dmitry A. Lyashenko — writing the original text, final conclusions, article design.

Maksim E. Nikolaev — writing the original text, final conclusions, article design.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Термогравитационная вентиляция жилых зданий

Адхам Иминжанович Гиясов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются концептуальные основы модели системы термогравитационной вентиляции жилых зданий, основанные на исследовании зданий с низкими потребностями в вентиляции в климатических условиях, где температурные различия между внутренним и внешним воздухом значительны. Исследуется гравитационная вентиляция в контексте термического режима стен при инсоляции фасадов зданий, возводимых в регионах с доминированием высокого уровня солнечного теплового потока.

Материалы и методы. Для анализа и мониторинга светоинсоляционного и ветрового режимов территорий стран с продолжительным теплым периодом использован метод, основанный на базе данных гидрометеорологических справочников. Процесс естественной вентиляции изучен с помощью методов солнечно-инсоляционного анализа конструктивной оболочки зданий в программе Revit, а также на основе натурных исследований инсоляционного и термического режимов этой оболочки.

Результаты. Разработано теоретическое положение термогравитационной вентиляции зданий для регионов с продолжительным теплым периодом. Составлена физико-математическая модель системы термогравитационной вентиляции, описывающая естественный процесс циркуляции воздуха в помещениях, основанный на разнице плотностей воздуха внутри и снаружи здания. Изучен механизм естественной аэрации квартир в зданиях с использованием комплексного подхода, включающего натурные экспериментальные исследования, математическое моделирование микроклиматических и теплофизических процессов, а также применение программного обеспечения и тепловизионного обследования.

Выводы. Разработанное теоретическое положение термогравитационной вентиляции зданий для регионов с продолжительным теплым периодом позволило сформулировать физико-математическую модель системы термогравитационной вентиляции зданий, описывающую естественный процесс циркуляции воздуха в помещениях, основанный на разнице плотностей воздуха внутри и снаружи здания. В целом термогравитационная вентиляция является эффективным и экологически чистым решением для обеспечения естественного воздухообмена, поддерживая комфортный воздушный режим в зданиях, особенно в условиях маловетреной погоды и штилей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: термогравитационная вентиляция, здания, помещения, термический режим, температура, микроклимат, теплофизика, инсоляция, конструктивная оболочка

Благодарности. Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды Национального исследовательского Московского государственного строительного университета по проблеме «Функция, конструкция и среда в архитектуре зданий и городов» в аспекте «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности зданий».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гиясов А.И. Термогравитационная вентиляция жилых зданий // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 10. С. 1577–1595. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1577-1595

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

Thermogravitational ventilation system for residential buildings

Adham I. Giyazov

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

ABSTRACT

Introduction. The article discusses the conceptual foundations of the model of a thermogravitational ventilation system for residential buildings, based on the study of buildings with low ventilation needs in climate conditions where the temperature difference between indoor and outdoor air is great. Gravity ventilation is considered in the context of the thermal regime of walls in the course of insolation of building facades erected in regions with predominantly high solar heat fluxes.

Materials and methods. A method involving a database of hydrometeorological reference books was used to analyse and monitor the sunlight and wind regime in the countries with extended warm seasons. The process of natural ventilation was studied in the Revit program using methods of sunlight analysis of structural shells of buildings; field studies of insolation and thermal regimes were also employed.

Results. A theoretical proposition was developed for the thermogravitational ventilation of buildings in areas featuring long warm seasons. A physical and mathematical model of a thermogravitational ventilation system was devised; it describes

a natural process of indoor air circulation based on a difference in the air density inside and outside buildings. An integrated approach was applied to study the mechanism of natural aeration of apartments; full-scale experimental studies were conducted; mathematical models of microclimate and thermophysical processes were developed; software and thermal imaging surveys were employed.

Conclusions. The author's theoretical proposition, developed for thermogravitational ventilation in buildings erected in areas with long warm seasons, enables researchers to devise a physical and mathematical model of a thermogravitational ventilation system of buildings, describing the natural process of indoor air circulation based on a difference in indoor and outdoor air density. In general, thermogravitational ventilation is an effective and environmentally friendly solution for natural air exchange, because it maintains a comfortable indoor air regime, especially in low-wind and calm environments.

KEYWORDS: thermogravitational ventilation, buildings, premises, thermal regime, temperature, microclimate, thermal physics, insolation, structural shell

Acknowledgments. This project was implemented in compliance with the research plan of Department of Architectural and Civil Engineering Design and Environmental Physics of the National Research Moscow State University of Civil Engineering; it focuses on research in the function, design, and environment in the architecture of buildings and cities in the context of energy saving and improving the energy efficiency of buildings.

FOR CITATION: Giyazov A.I. Thermogravitational ventilation system for residential buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(10):1577-1595. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1577-1595 (rus.).

Corresponding author: Adham I. Giyazov, GiyazovAI@gic.mgsu.ru, adham52@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

С каждым днем изменяется тарифная политика и отмечается рост цен на энергоносители. В этой ситуации актуальным становится решение задачи по повышению комфортности микроклимата в помещениях зданий с максимальным энергосбережением. Это важно для регионов, которые, с одной стороны, недостаточно обеспечены собственными ресурсами; а с другой — характеризуются продолжительными и экстремально теплыми климатическими условиями. Подобные климатические особенности наблюдаются на территории большинства азиатских, африканских, арабских, латиноамериканских, южно-европейских стран, Австралии, центральноазиатских и закавказских государств СНГ, республик Северного Кавказа и южного региона России, включая новые территории и другие. В процессе проектирования, строительства и эксплуатации зданий в этом случае остро стоит необходимость снижения летнего перегрева внутренней среды и поддержания комфортных тепловых условий в помещениях в зимний период. В решении данной проблемы роль системы естественной вентиляции за счет разности температур внутренней и внешней воздушной среды является приоритетной.

Термогравитационная вентиляция помещений зданий при открытом режиме их эксплуатации — экономически целесообразна и экологически безопасна. Она предпочтительнее местных систем кондиционирования, которые могут вызывать простудные заболевания из-за регулярных перепадов температур между помещениями, а также между внутренней и внешней средой.

Модель системы термогравитационной вентиляции зданий описывает естественный процесс циркуляции воздуха в помещениях, основанный на разнице плотностей воздуха внутри и снаружи здания.

Основными элементами и принципами такой системы служат эффективные способы естествен-

ной вентиляции помещений за счет теплового напора, а также теплого воздуха, поднявшихся в помещении и в пристенном слое снаружи здания благодаря тепловой конвекции и создающих разницу в плотности между слоями воздуха.

Элементы такой системы пассивны и не требуют энергопотребления для обеспечения воздухообмена между помещениями зданий и внешней воздушной средой.

Города южных регионов СНГ, государств Африки, арабских, латиноамериканских и европейских стран отличаются жаркими сезонами продолжительностью 8 и более месяцев с аридными условиями, характеризующимися низкой скоростью ветра от 1 до 3 м/с (с повторяемостью штиля до 60–70 %) и высокой температурой воздуха, достигающей 48 °С, и интенсивностью солнечной радиации до 980 Вт/м² и более, что определяет рациональность использования термогравитационной вентиляции. При этом существенна роль энергии солнца для эффективного использования термогравитационной вентиляции помещений. В качестве примеров можно привести следующие города: Алма-Ата, Баку, Душанбе, Ташкент, Каир, Лагос, Найроби, Дубай, Доха, Эр-Рияд, Мехико, Лима, Мадрид, Афины, Рим и др.

Эти города расположены в регионах, в которых природно-климатические факторы могут создавать условия для поддержания комфортного микроклимата внутри зданий, и различные методы вентиляции, в том числе термогравитационная, могут играть важную роль.

Указанный тип вентиляции позволяет оптимально использовать разницу в температуре между внутренним и внешним воздухом для естественной циркуляции воздуха в зданиях, что особенно ценно, когда механическая вентиляция может быть нестабильной или требует существенных энергетических затрат.

Термогравитационная вентиляция зданий привлекала внимание как отечественных, так и зару-

бежных ученых, работающих в области архитектуры и инженерных систем зданий [1–6]. Они анализировали влияние различных факторов на эффективность естественной вентиляции, включая термогравитацию. Эти исследователи внесли значительный вклад в изучение термогравитационной вентиляции и других аспектов естественной вентиляции зданий, разрабатывая методики моделирования процессов, направленные на повышение эффективности и комфорта внутри помещений¹.

Исследование свободного конвективного течения воздуха в пристенном микроклиматическом слое включает теоретические положения и экспериментальные исследования отечественных и зарубежных ученых в области свободной конвекции, а также теплового побуждения систем вентиляции. Изучается влияние конвективных потоков на формирование комфортного микроклимата в помещениях и оптимизацию вентиляционных систем [7–11].

Решению внутренних задач естественной вентиляции посвящен ряд работ отечественных и зарубежных ученых [12–14].

В области естественной вентиляции помещений на данный момент накопилось множество вопросов, которые на протяжении длительного времени не имеют четких теоретических и инженерных решений в проектировании и эксплуатации современных зданий с учетом особенностей климатических условий различных регионов, что подчеркивает актуальность дальнейшего изучения указанной темы [15–17].

В некоторых случаях это может привести к значительным просчетам при определении уровня теплозащиты зданий и их ограждений, оценке эффективности различных типов ограждающих конструкций и выборе оптимальных систем вентиляции [18–20]. Важно также отметить еще один фактор — необходимость оценки и контроля эффективности работы систем естественной вентиляции. Эта задача является сложной, поскольку скорость и расход воздуха зависят от воздействия природных движущих сил, таких как ветровой и тепловые напоры, которые существенно варьируются в течение года [21–24].

Согласно данным Федеральной службы государственной статистики, основную часть жилого фонда России составляют здания, построенные до 1990 г., которые характеризуются наличием систем естественной вентиляции. Такая тенденция сохраняется и сегодня благодаря низким капиталовложениям, простоте обслуживания и долговечности. Однако данные системы имеют недостатки. В холодный период они обеспечивают качественный воздухообмен вследствие температурной разницы, но летом их эффективность снижается из-за открытого режима

эксплуатации помещений. В теплое время вентиляция осуществляется в основном за счет периодического проветривания, что затрудняет поддержание требуемого микроклимата в жилых помещениях, санитарных узлах и кухнях. Эффективность такого проветривания зависит от силы и направления ветра и может сильно варьироваться в течение суток.

Цель исследования — разработка методики системы естественной аэрации, которая повысит микроклиматическую комфортность путем эффективного естественного воздухообмена в помещениях зданий, расположенных на территориях с продолжительным теплым периодом.

Намеченная цель будет достигнута следующими способами:

- выявлением роли инсоляции вертикальных поверхностей здания в формировании естественного конвективного потока в пристенном слое воздуха и тепловой воздушной оболочке вокруг здания в целом;
- установлением схемы движения воздушного потока у поверхности стен снаружи и выявлением энергетических характеристик их термического режима, являющихся причиной формирования тепловетрового режима в пристенном микроклиматическом слое воздуха при инсоляции фасада здания;
- определением значения энергоактивных фасадных систем в контексте термогравитационной вентиляции жилых зданий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В целях исследования физического процесса системы термогравитационной вентиляции помещений зданий проанализирован мониторинг светоинсоляционного и ветрового режима территорий стран, характеризующихся продолжительным теплым периодом, на основе базы данных гидрометеорологических справочников геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, Среднеазиатского научно-исследовательского гидрометеорологического института им. В.А. Бугаева, справочных сведений ежемесячников закавказских республик, а также современной всемирной базы данных NASA SSE.

Результаты анализа показывают, что в течение всего сезона преобладают маловетрие и штилевые условия со средней скоростью ветра от 1 до 3 м/с. Это приводит к ухудшению естественной вентиляции и создает дискомфортное микроклиматическое явление «духоты» в помещениях зданий, в результате чего температура воздуха может превышать комфортный предел, достигая 34–36 °С при температуре внешней среды в тени до 48 °С и выше. В этой связи принято направление исследования по оптимизации естественной вентиляции помещений зданий целенаправленным использованием систем с радиационным подогревом наружных конструктивных плоскостей здания и вытяжных каналов с тепловым побуждением, что актуально

¹ Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). М. : Высшая школа, 1982. 416 с.

в повышении комфортности микроклимата зданий. Подобный подход особенно эффективен в зданиях с низкими потребностями в вентиляции и в климатических условиях, где температурные различия между внутренним и внешним воздухом значительны. Следует отметить, что такие целенаправленные исследования системы естественной аэрации жилищ для экономии энергии и снижения эксплуатационных затрат ввиду их комплексности проводятся впервые и акцентированы на развитие теории теплового режима зданий.

Процесс естественной вентиляции изучался с помощью методов солнечного анализа конструктивной оболочки зданий в программе Revit, а также на основе натурных исследований инсоляционного и термического режимов данной оболочки. Кроме того, проводилось исследование пристенного слоя воздуха по всей высоте зданий в соответствии с «Методическими указаниями по производству микроклиматических обследований в период изысканий», «Методами определения сопротивления воздухопроницанию ограждающих конструкций»,

«Методами современного тепловизионного контроля» и «Методами проверки теплозащитных качеств и воздухопроницаемости ограждающих конструкций зданий». Для этих целей использовались современные стандартные актинометрические, метеорологические и теплофизические приборы.

В методах исследования учтены ключевые положения актуальных нормативно-технических документов².

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для обеспечения эффективности вентиляции помещений и всего здания необходимо учитывать объемно-планировочные и конструктивные архитектур-

² СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха; СП 50.13330.2024. Тепловая защита зданий; СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий; ГОСТ 31167-2009. Здания и сооружения. Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях.

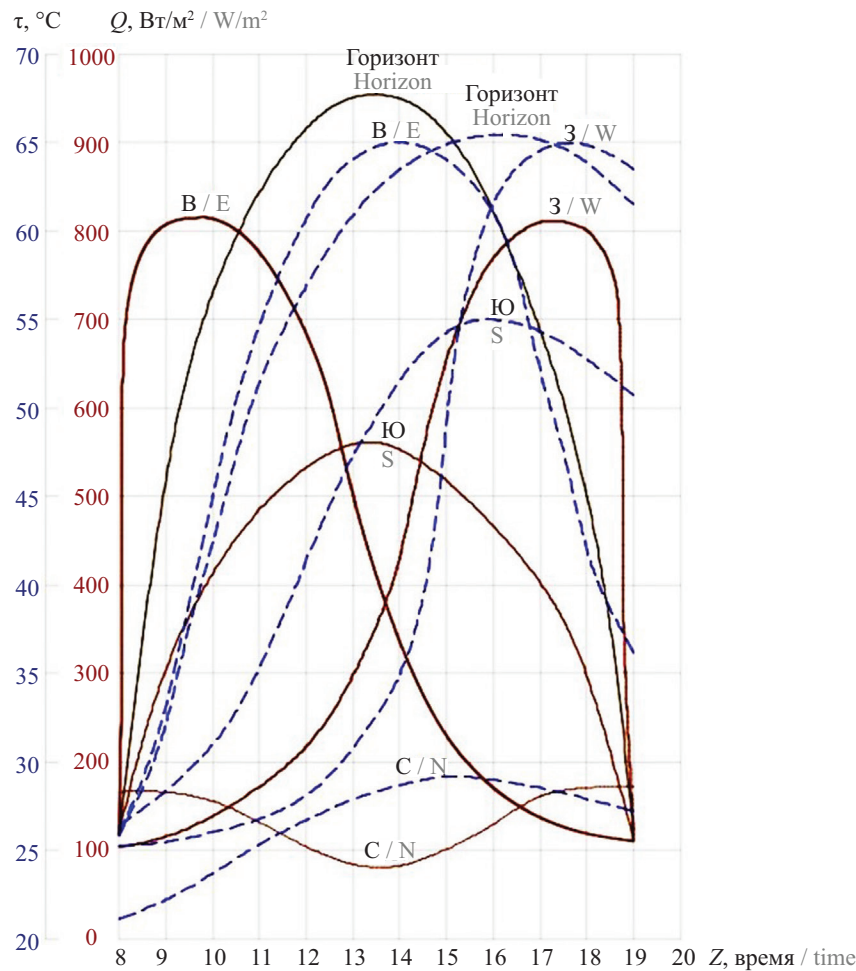


Рис. 1. Модель дневного хода солнечной энергии — и термического режима - - - поверхности стен разной ориентации

Fig. 1. Model of the daily course of solar energy — and the thermal regime - - - of wall surfaces having different orientations

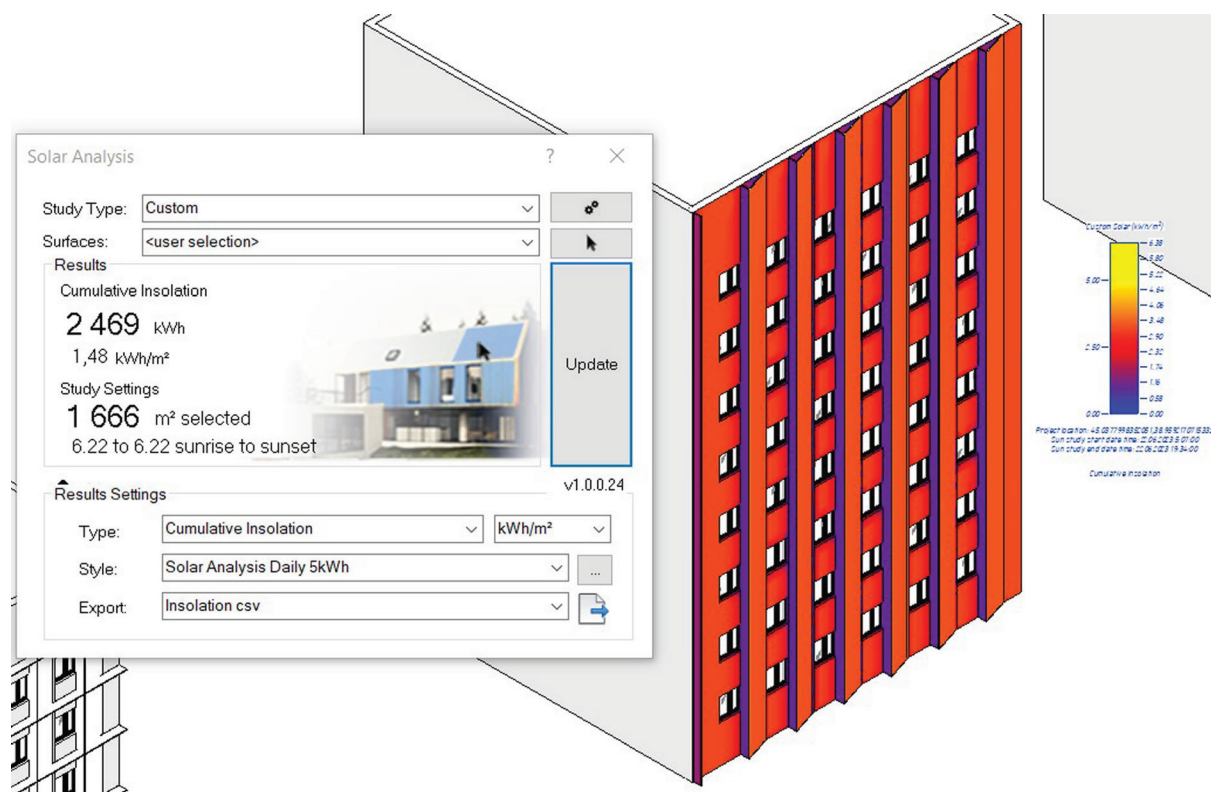


Рис. 2. Солнечный анализ в Revit

Fig. 2. Solar analysis made in Revit

ные особенности, климатические условия объекта строительства, а также расположение вентиляционных каналов и отверстий для притока и оттока воздушного потока.

При наличии значительной разницы в температуре между внутренним и внешним воздухом теплый воздух в здании, согласно теории конвективного потока, будет подниматься к потолку, создавая поток, который может быть отведен через специальные вентиляционные отверстия или каналы при закрытом режиме эксплуатации помещений и одновременно через форточки, фрамуги или оконные створки при открытом режиме эксплуатации зданий. Эффективность термогравитационной вентиляции квартир в маловетренных, штилевых погодных условиях и при температурных контрастах пристенного слоя противоположных стен фасадов зданий и спланированных в их сторону помещений может быть особенно значимой, поскольку она не требует активных механических систем, что является экономически выгодным (рис. 1, 2, табл. 1).

В маловетренные и штилевые погодные периоды система термогравитационной вентиляции не затрудняется наружными ветровыми факторами, что способствует более стабильной и предсказуемой циркуляции воздуха внутри зданий между помещениями разной ориентации.

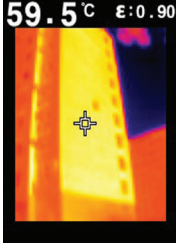
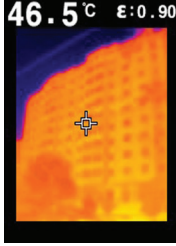
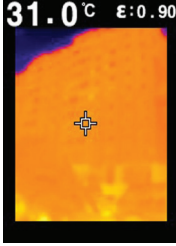
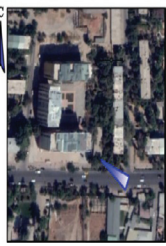
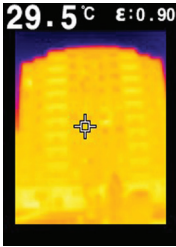
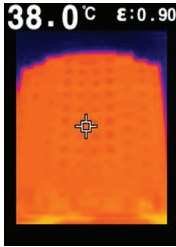
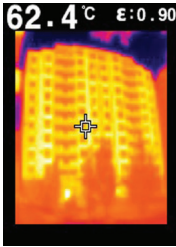
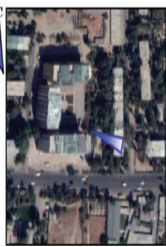
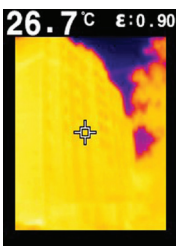
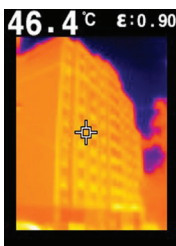
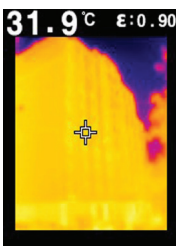
Эффективность термогравитационной вентиляции за счет теплового напора находится в прямой зависимости от термического режима поверхно-

стей стен фасадов (до 65 °C и более) при облучении их поверхностей солнечной радиацией (900 Вт/м²), формирующего температурно-ветровой режим пристенного слоя воздуха (рис. 3). При этом восходящие конвективные потоки температурой более 75 °C со скоростью до 3 м/с и более, сформированные в пристенной оболочке микроклиматического слоя воздуха, способствуют подтоку воздуха из помещений, активизируя естественную аэрацию. Это приводит к перемещению воздушных потоков между противоположными смежными помещениями за счет термического режима конструктивной оболочки зданий и формирующегося в пристенном слое контрастирующего тепло-ветрового режима, что отличается от климатических данных, нормируемых для данного района строительства (рис. 4, 5).

Одним из ключевых условий успешного проведения натурных исследований в современных 16-этажных жилых зданиях широтной и меридиональной ориентации стала синхронность действий наблюдателей и одновременность измерений. При проведении актинометрических, теплофизических, микроклиматических тепловизионных измерений были привлечены студенты, проходившие производственную практику. Экспериментальные инструментальные измерения скорости движения воздуха выполнялись в оконных проемах помещений квартир на уровне 9 этажа 16-этажных зданий, не загороженных летними помещениями, и в межкомнатных дверных проемах. Одновременно осуществлялись

Табл. 1. Модель тепловизионных съемок стен фасадов многоквартирных зданий

Table 1. Model of thermal imaging surveys of walls of facades of multistorey buildings

Ориентация Orientation	Общий вид застройки General view of the built-up area	Наблюдение через телевизор FLIR TG165, ч Surveillance via FLIR TG165 TV, h			Месторасположение зданий в застройке Location of buildings in the built-up area
		8:00	13:00	19:00	
Термический режим фасада восточной ориентации Thermal regime of the east-facing façade					
Термический режим фасада западной ориентации Thermal regime of the west-facing façade					
Термический режим фасада южной ориентации Thermal regime of the south-facing façade					

замеры скорости ветра на территории реальной жилой застройки, прилегающей к экспериментальным зданиям.

Для оценки результатов эксперимента проанализированы гигиенические и строительные нормативы и рекомендуемые отечественными и зарубежными исследователями параметры верхней границы комфорта температуры в жилище для теплого периода года:

- температура воздуха дневная 27–28 °С;
- температура воздуха ночная 22–26 °С;
- подвижность воздуха в пределах 0,2 м/с.

С целью изучения процесса аэрации помещений квартир за счет теплового напора, формируемого при условии инсоляции фасадов, были проведены инструментальные замеры следующих показателей микроклимата:

- температуры поверхности стен, воздуха в помещениях и пристенном слое по высоте в 16-этажных жилых зданий широтной и меридиональной ориентации;

- силы и направления пристенного конвективного потока по высоте инсолируемых и затененных стен исследуемых зданий;

- скорости движения воздуха в характерных точках у оконного проема смежных помещений и дверного проема между помещениями квартир.

В результате натурных экспериментальных измерений установлено, что инсолируемые восточная, западная и южные стены фасада нагревались до 65 °С и более до 70 °С, в то время как теневая южная стена прогревалась только до 32 °С, что свидетельствует о разнице в температуре инсолируемых и затененных стен зданий и их чередовании в течение светового дня в зависимости от условия солнечного облучения. При этом температура пристенного слоя воздуха у стен инсолируемого фасада на уровне карниза достигала 70 °С, в теневой зоне — 30–35 °С. Температура воздуха в помещениях, обращенных к облучаемому фасаду, при закрытом режиме эксплуатации квартир доходила до 32–34 °С, в помещениях теневой стороны — до 28–30 °С. Эти высокие температуры

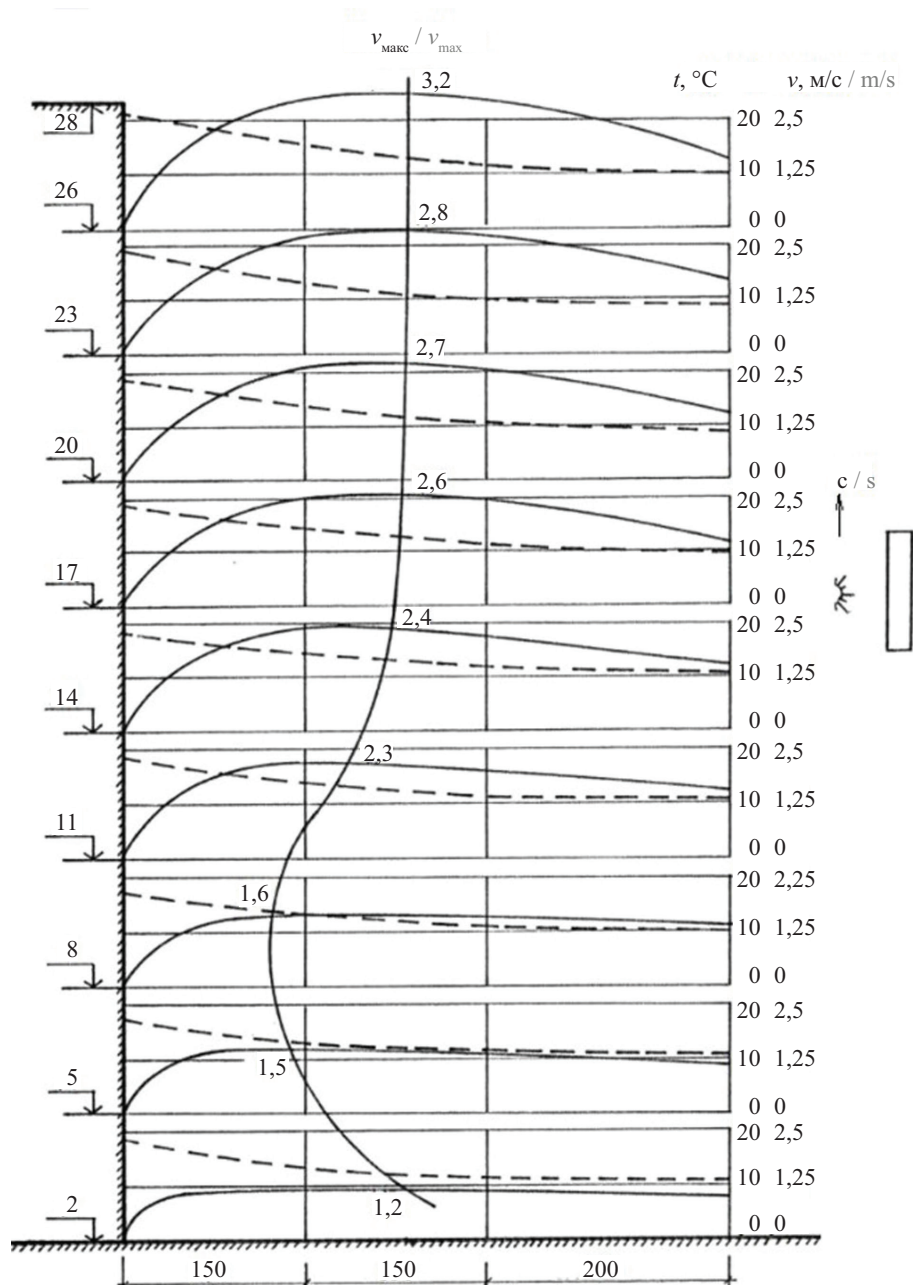


Рис. 3. Модель профиля скорости — и температуры --- восходящего потока в пристенном слое воздуха по высоте, м, стены здания западной ориентации и прилегающей территории при инсоляции 18 ч

Fig. 3. Model of the velocity — and temperature --- profile of the ascending flow in the near-wall air layer along the height (m) of the west-facing wall of a building and the adjacent territory during 18-hour insolation

на всех этажах превышают верхнюю границу теплового комфорта и вызывают явление «духоты». Возле инсолируемой стены наблюдалось образование мощного восходящего воздушного конвективного потока со скоростью до 2,8–3,0 м/с, в то время как у теневой стороны фиксировались нисходящие потоки со скоростью до 0,6 м/с при максимальной температуре наружного воздуха 40–42 °С.

Следует отметить, что в период исследования температурно-влажностного и ветрового режима в квартирах температурный градиент не превышал 1–1,5 °С.

При закрытом режиме эксплуатации квартир в утренние часы (10:00) скорость движения воздуха в помещениях, ориентированных на запад, составляет 0,08 м/с, а в помещениях восточной ориентации — 0,1 м/с, при средней температуре воздуха 26 °С. В середине дня (14:00) скорость воздуха в помещениях западного направления увеличивается до 0,12 м/с, а в восточных — до 0,51 м/с, при средней температуре воздуха 29 °С. В вечернее время (17:00) скорость движения воздуха в помещениях, ориентированных на запад, составляет 0,15 м/с, а на восток — 0,16 м/с, при средней температуре воздуха 32 °С. Это приво-

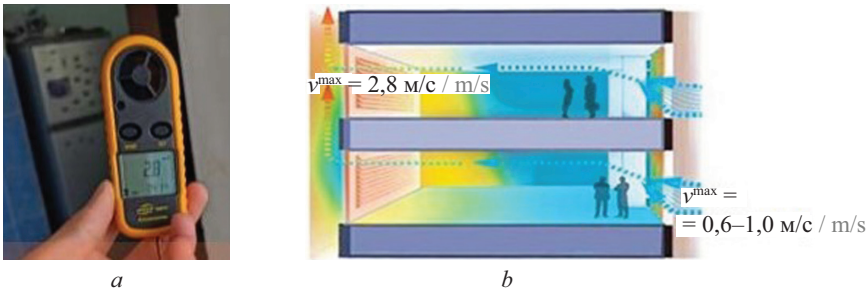


Рис. 4. Инструментальный замер (а) и схема (b) аэрации квартир при открытом режиме эксплуатации за счет термогравитационной конвекции
Fig. 4. Instrumental measurement (a) and layout (b) of aeration in apartments in the open mode of operation due to thermo-gravitational convection

дит к дискомфортному температурному и аэрационному режиму во второй половине дня.

При открытом режиме эксплуатации квартир (в утренние, вечерние и ночные периоды) наблюдалось движение относительно прохладного воздуха из помещений, обращенных к теневому фасаду, в сторону помещений, ориентированных на инсолируемый фасад. Далее воздушный поток, проходя через оконные проемы, сливался с общим конвективным потоком пристенного слоя облучаемого фасада (см. рис. 4).

На основе анализа результатов натурных измерений средней скорости движения воздуха в квартирах исследуемых зданий отмечаются следующее схемы проветривания:

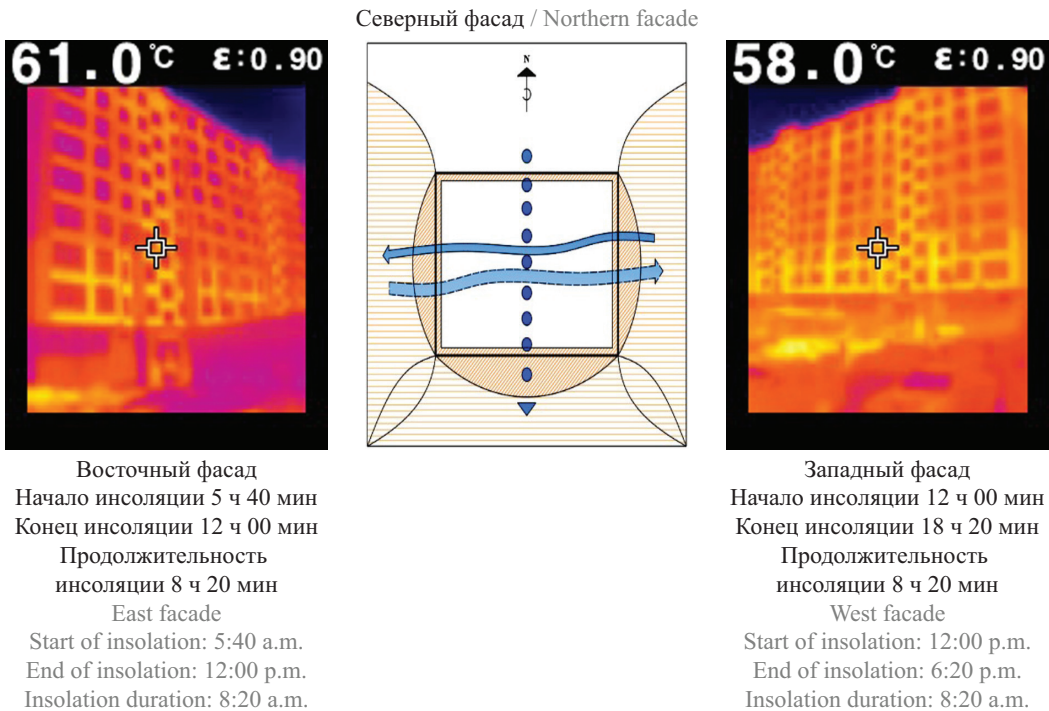
- в квартирах со сквозным проветриванием — 1,4–1,6 м/с;
- в квартирах с боковым проветриванием — 0,8–1,2 м/с;
- в квартирах с односторонним проветриванием — 0,3–0,4 м/с;

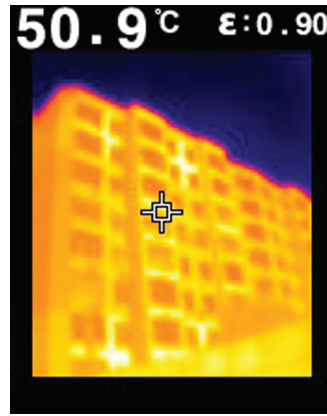
- в квартирах со сквозным проветриванием — до 2 м/с и имитацией бокового проветривания — 1–1,2 м/с.

Натурные измерения продемонстрировали, что повышение скорости движения воздуха на 1–2 м/с приводит к снижению теплового эквивалента температуры воздуха на 2–3 °С. Охлаждающий эффект воздушной среды в помещениях изучаемых квартир, который влияет на тепловое состояние человека, можно оценить на основе данных об охлаждающем эффекте ветра гигиенических исследований. Эти сведения позволяют определить, как различные скорости ветра способствуют изменению температуры и, следовательно, комфортности микроклимата в помещениях.

Охлаждающий эффект может составить:

- при скорости ветра 0,1 м/с — отсутствует;
- при скорости 0,25 м/с — 0,5 °С;
- при скорости 1,5 м/с — 4 °С;
- при скорости 3 м/с — 6 °С;
- при скорости 5 м/с — 7 °С.





Начало инсоляции 8 ч 30 мин

Конец инсоляции 15 ч 30 мин

Продолжительность

инсоляции 7 ч 00 мин

Start of insolation: 8:30 a.m.

End of insolation: 3:30 p.m.

Duration of insolation: 7:00 a.m.

Рис. 5. Модель аэрации помещения зданий за счет теплового напора: — зона тепло-ветрового возмущения от инсолируемой стены; — зона тепло-ветрового возмущения от инсолируемой придомовой территории; — направление воздухообмена

Fig. 5. Model of aeration of the premises of buildings due to thermal pressure: — zone of heat-wind disturbance from the insulated wall; — zone of heat-wind disturbance from the insulated adjacent territory; — direction of air exchange

Эта информация показывает, как увеличение скорости ветра влияет на степень охлаждения окружающей среды.

При скорости ветра 1,5 м/с тепловой эквивалент может составить:

- при температуре 21 °C — 5 °C;
- при температуре 32 °C — 2,5 °C;
- при температуре 43 °C — 1 °C, что соответ-

ствует снижению воздействия температуры воздуха соответственно на 5; 2,5 и 1 °C.

В итоге отмечаются аэродинамические и микроклиматические преимущества сквозного проветривания по сравнению с другими схемами проветривания квартир. Именно поэтому, согласно требованиям современного нормирования, сквозное проветривание является обязательным для всего IV строительно-климатического района СНГ и России, а также для территорий экваториальных стран с доминирующим теплым климатом.

В рассматриваемых жилых зданиях с архитектурно-планировочной структурой лестничные клетки фактически играют роль шахты вертикального проветривания, способствуют переносу воздуха по вертикали и тем самым интенсифицирует проветривание квартир.

Подытоживая результаты натурных исследований, необходимо отметить, что в целом аэрационный режим квартир оказывается интенсивным и превышающим верхний гигиенически допустимый предел значений внутренней подвижности воздуха.

Анализ результатов натурных экспериментальных исследований естественной аэрации квартир дал возможность разработать основные положения теоретического расчета системы термогравитационной вентиляции жилых зданий.

Ранее автором были детально изучены микроклиматические и теплофизические процессы теплозащитной конструктивной оболочки и в связи с тепловой воздушной оболочкой зданий, на основе которых разработана физико-математическая модель тепло-ветровых процессов в пристенном слое воздуха при инсоляции стен фасадов зданий с различной ориентацией. Эта модель позволяет изучать взаимодействие температуры и скорости воздуха, а также их влияние на микроклимат в помещениях, что способствует улучшению проектирования систем вентиляции и кондиционирования.

В соответствии с предыдущими результатами исследований автора физических процессов в пристенном микроклиматическом слое воздуха с целью разработки теоретического положения термогравитационной вентиляции рассматриваются два помещения жилого здания с открытыми окнами на инсолируемом и теневом фасадах, а также с открытой дверью между ними. В данной модели левое окно на теневом фасаде с площадью S_1 используется для притока воздуха (инфильтрации), а правое окно на инсолируемом фасаде с площадью S_3 — для оттока и вытяжки (эксфильтрации). Площадь двери составляет S_2 .

Для количественной оценки термического проветривания применяется методика воздухообмена, изложенная в трудах Э.И. Рэттера [25], которая для нашего случая будет иметь следующую последовательность.

В рассматриваемых трех проемах (окна и дверь) давление при формировании теплового потока в пристенном микроклиматическом слое воздуха будет зависеть от множества факторов, таких как температура воздуха, разница температур между внутренней и внешней средой, а также конструктивно-физические свойства самих проемов. В частности:

- для окна на теневом фасаде (S_1), которое работает на приток воздуха (инфильтрацию), давление будет определяться температурной разницей между внутренним воздухом и наружным холодным воздухом. Этот поток будет направлен в помещение;
- для окна на инсолируемом фасаде (S_3), функционирующем на отток и вытяжку (эксфильтрацию), давление будет определяться более высокой температурой воздуха в помещении по сравнению с наружным. Это создаст давление, направленное наружу;
- для двери (S_2), соединяющей два помещения, давление будет зависеть от разницы в температуре и скорости движения воздуха между этими помещениями. Воздушный поток будет направлен в сторону с более низким давлением, что приведет к естественному воздухообмену между помещениями.

Таким образом, в каждом из этих проемов тепловой поток и направление воздушных потоков будут зависеть от температурных градиентов и давления в разных точках системы:

$$P_1 = H_1 g (\rho_{в1} - \rho_{н}^т); \tag{1}$$

$$P_2 = H_0 g (\rho_{в2} - \rho_{в1}); \tag{2}$$

$$P_3 = H_1 g (\rho_{н}^н - \rho_{в2}). \tag{3}$$

Дневной ход теплового напора у инсолируемой и теневой стены, являющийся функцией теплового потока стеновой конструкции, показывает изменения теплового воздействия на стены в течение дня. На рис. 6 представлено, как тепловой напор изменяется в зависимости от времени суток.

Для инсолируемой стены тепловой напор будет более выраженным в дневное время, когда солнечное излучение оказывает наибольшее воздействие, приводя к максимальному прогреву поверхности стены. В то время как на теневой стене напор будет значительно ниже, поскольку она не подвергается прямому солнечному облучению, и ее температура будет оставаться более стабильной в течение дня.

Рис. 6 иллюстрирует эти изменения теплового напора в зависимости от времени суток, что важно для понимания термогравитационных процессов и вентиляции в помещении.

Модель теплового напора у стен разной ориентации описывает динамику конвективных потоков вблизи фасадов зданий в зависимости от солнечной инсоляции, температуры и других факторов. Тепловой напор при этом зависит от нескольких ключевых факторов: ориентации стен, условий инсоляции фасадов, температурных градиентов, тепловых потоков стеновых конструкций.

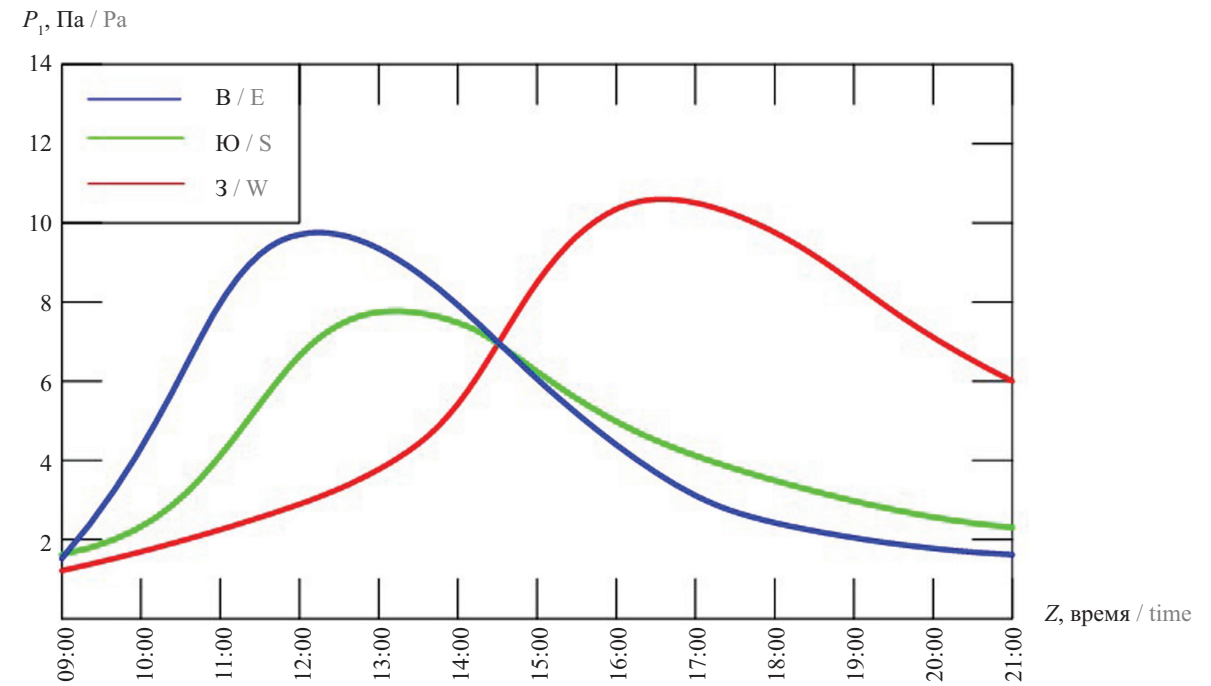


Рис. 6. Модель теплового напора у стен разной ориентации

Fig. 6. Model of thermal pressure near walls facing different directions

Сложим первое (1) и третье (3) равенства поэлементно. Обозначим полученную сумму $P_1 + P_3$ через P_0 :

$$P_0 = P_1 + P_3 = H_1 g \left[(\rho_{\text{в1}} - \rho_{\text{н}}^{\tau}) + (\rho_{\text{н}}^{\text{н}} - \rho_{\text{в2}}) \right]. \quad (4)$$

Для расчета избыточного давления, преобразуя его в кинетическую энергию воздуха при входе через левый приточный проем, используются уравнения, основанные на законах аэродинамики и термодинамики. С учетом потери давления при входе из уравнений (1) и (3) получаем уравнение для приточного левостороннего проема. Это уравнение позволяет определить скорость воздушного потока на выходе из оконного проема, принимая во внимание потерю давления при входе и трансформацию избыточного давления в кинетическую энергию:

$$H_1 g (\rho_{\text{в1}} - \rho_{\text{н}}^{\tau}) = (1 - j) \frac{\rho_{\text{в1}} v_1^2}{2g}, \quad (5)$$

где $j \frac{\rho_{\text{в1}} v_1^2}{2g}$ — потеря давления на входе, Па; v — скорость воздушного потока в левом приточном проеме 1. Откуда:

$$v_1 = \sqrt{\frac{1}{1 + j_1}} \cdot \sqrt{2gH_1 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{н}}^{\tau}}{\rho_{\text{в1}}}\right)}. \quad (6)$$

Скорость воздушного потока в среднем межкомнатном дверном проеме составляет:

$$v_2 = \sqrt{\frac{1}{1 + j_2}} \cdot \sqrt{2gH_0 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{в1}}}{\rho_{\text{в2}}}\right)}. \quad (7)$$

Скорость воздушного потока в правом вытяжном оконном проеме:

$$v_3 = \sqrt{\frac{1}{1 + j_3}} \cdot \sqrt{2gH_1 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{в2}}}{\rho_{\text{н}}^{\text{н}}}\right)}, \quad (8)$$

где j_1, j_2, j_3 — коэффициенты аэродинамического сопротивления для приточных и вытяжных оконных проемов, а также дверного проема, варьируются в зависимости от их геометрии и конструкции.

Масса воздуха, протекающая через проемы 1, 3 и 2 в одну секунду:

$$G_1 = A_1 \rho_{\text{в1}} F_1 \sqrt{\frac{1}{1 + j_1}} \cdot \sqrt{\frac{2g\Delta T_1}{T_{\text{в1}}}} \cdot \sqrt{H_1}; \quad (9)$$

$$G_2 = A_2 \rho_{\text{в2}} F_2 \sqrt{\frac{1}{1 + j_2}} \cdot \sqrt{\frac{2g\Delta T_2}{T_{\text{в2}}}} \cdot \sqrt{H_0}; \quad (10)$$

$$G_3 = A_3 \rho_{\text{н}}^{\text{н}} F_3 \sqrt{\frac{1}{1 + j_3}} \cdot \sqrt{\frac{2g\Delta T_3}{T_{\text{н}}^{\text{н}}}} \cdot \sqrt{H_1}, \quad (11)$$

где A_1, A_3 и A_2 — коэффициенты сжатия струи;

$$\sqrt{\frac{1}{1 + j_1}} = \mu_1, \sqrt{\frac{1}{1 + j_3}} = \mu_3, \sqrt{\frac{1}{1 + j_2}} = \mu_2 \text{ — коэффициенты}$$

расхода для рассматриваемых проемов, обозначены как $\mu_1 = \mu_3 = \mu_2 = 0,68$. Для расчета массы инфильтрационного воздуха, поступающего через эти проемы, кг/с, можно воспользоваться следующим уравнением:

$$G_1 = \mu_1 \rho_{\text{в1}} F_1 \sqrt{2g \frac{\Delta T_1}{T_{\text{в1}}}} \sqrt{H_1} \quad (12)$$

для массы эксфильтрационного воздуха используется та же формула, которая применяется для инфильтрационного воздуха, кг/с:

$$G_3 = \mu_3 \rho_{\text{н}}^{\text{н}} F_3 \sqrt{2g \frac{\Delta T_3}{T_{\text{н}}^{\text{н}}}} \sqrt{H_1}; \quad (13)$$

$$G_2 = \mu_2 \rho_{\text{в2}} F_2 \sqrt{2g \frac{\Delta T_2}{T_{\text{в2}}}} \sqrt{H_0}. \quad (14)$$

Решение задачи по определению площадей отверстий при заданном воздухообмене (уравнения (9)–(11)) выполняется, предположив, что:

- формула (9) даст воздухообмен для одного окна;
- формула (10) — для другого типа проема, двери;
- формула (11) — для вентиляционного проема, окна с другими характеристиками.

Обычно для расчета площади отверстий можно использовать зависимости, основанные на уравнениях, которые связывают скорость потока, плотность воздуха и площадь проема.

Наибольший воздухообмен, как указано, наблюдается для оконного проема 3, расположенного на инсолируемом фасаде, с максимальным массовым расходом воздуха. Это связано с тем, что такие проемы чаще всего подвержены сильному тепловому напору, который создает более высокий воздухообмен.

Таким образом, для определения точных площадей отверстий при заданном воздухообмене требуется подставить данные о расходе воздуха и скорости потока в соответствующие формулы.

Площадь оконного проема для эксфильтруемого воздуха в первом приближении может быть рассчитана по следующей формуле:

$$F = \frac{G_{\text{макс}}}{\mu_1 \rho_{\text{в1}} \sqrt{gH_1 \frac{\Delta T_1}{T_{\text{в1}}}}}. \quad (15)$$

Для оценки инфильтрационного (входного) и эксфильтрационного (выходного) воздуха в помещениях с несколькими окнами на различных фасадах, а также для определения дисбаланса между притоком и вытяжкой через открытые проемы можно воспользоваться методикой, предложенной В.П. Ти-

товым и соавт.³ Данная методика основывается на расчетах, которые учитывают влияние различных факторов, таких как ориентация окон, разница температур между внешней и внутренней средой, а также скорость движения воздуха через проемы.

Примерная схема оценки дисбаланса между притоком и вытяжкой включает определение воздухообмена через каждый оконный проем, оценку влияния температурных и ветровых условий, построение уравнений для баланса притока и вытяжки, коррекцию на потери давления и определение дисбаланса.

Если приток и вытяжка не сбалансированы (например, из-за разных размеров окон, температуры и ветровых условий), это может привести к недостаточному воздухообмену в помещении, что влияет на комфорт и микроклимат. Чтобы достичь оптимального воздухообмена, нужно корректировать размеры, формы окон.

В естественной аэрации помещений конструктивные особенности окон играют ключевую роль в обеспечении необходимого воздухообмена и поддержании комфортного микроклимата. Различные типы окон, такие как одностворчатые, двухстворчатые и трехстворчатые, а также наличие фрагм и форточек влияют на эффективность вентиляции. Также важно учитывать способы открытия окон, которые могут быть горизонтальными (по часовой стрелке или против часовой стрелки) или вертикальными. Примером влияния положения створки на расход воздуха является следующий случай: если окно с нижнеподвесной створкой открыто на $k = 2$ см,

³ Титов В.П., Сазонов Э.В., Краснов Ю.С., Новожилов В.И. Курсовое и дипломное проектирование по вентиляции гражданских и промышленных зданий : учебное пособие для вузов. М. : Стройиздат, 1985. 208 с.

то расход воздуха может составлять от 20 до 50 м³/ч. В случае открытия окна с вращающейся створкой на $d = 6$ см расход воздуха может варьироваться от 60 до 170 м³/ч (рис. 7).

Таким образом, можно более точно рассчитать дисбаланс притока и вытяжки для различных оконных проемов с учетом тепловых факторов, что позволяет эффективно проектировать системы вентиляции и обеспечивать оптимальные условия микроклимата в помещениях.

Современные условия жизни в городах значительно влияют на качество воздуха в помещениях. Городской житель проводит около 90 % своего времени в закрытых пространствах. Экологические исследования показывают, что воздух внутри помещений в 4–6 раз загрязненнее и в 8–10 раз токсичнее, чем уличный воздух. Это обусловлено накоплением различных загрязнителей в закрытых помещениях, где системы вентиляции часто не обеспечивают необходимую очистку.

По данным Научно-исследовательского института экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.Н. Сысина, в обычной квартире может находиться до 150 различных видов химических испарений. Эти испарения могут исходить от множества источников, таких как лаки и краски, мебельные клеи, материалы из ДСП, бытовая химия, а также антропоксины — продукты жизнедеятельности человека и домашних животных.

Кроме того, около 90 % заболеваний приобретается именно внутри помещений. Это подчеркивает важность поддержания качественного воздуха в жилых и рабочих пространствах для здоровья человека.

В жилых зданиях, где отсутствует регулярное проветривание, невозможно создать микроклимат, приближенный к зоне комфорта. Поэтому для боль-

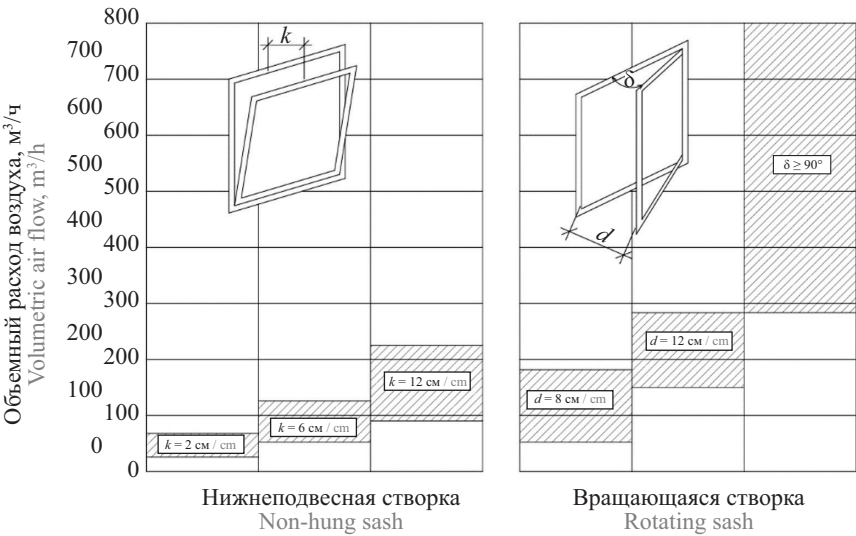


Рис. 7. Кратность воздухообмена

Fig. 7. Air exchange rate

ших городов кратность воздухообмена в помещениях должна составлять не менее 1,31 1/ч, что было подтверждено в ходе натурных исследований автора. Результаты показывают, что в помещениях, ориентированных как по широте, так и по меридиану, благодаря тепловому напору при открытом режиме эксплуатации подвижность воздуха достигает комфортного уровня.

Поводя итог результатам солнечного анализа, натурального экспериментального исследования и теоретического положения, необходимо отметить:

1) установлено, что условия системы термогравитационной вентиляции отвечают гигиеническим требованиям проветривания исследуемых помещений. Значения скорости движения воздушного потока находятся в пределах комфорта, основные характеристики которой определяют эффективность термогравитационной вентиляции в поддержании чистоты воздуха и стабильной температуры;

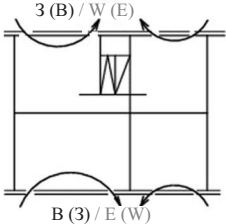
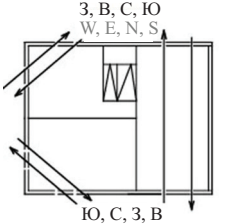
2) уточнено, что тепловой режим в помещениях с различной ориентацией в течение дня играет важную роль в создании комфортных условий для проживания. По наблюдениям температура воздуха в утренние часы во всех помещениях (северной, южной, восточной и западной ориентации) приближается к верхнему пределу комфортной зоны. Это означает, что в данное время температура воздуха находится на границе комфортного уровня для человека.

В середине дня и в вечерние часы температура воздуха в помещениях восточной, южной и западной ориентации в зависимости от условий инсоляции превышает пределы комфортной зоны. В этой

связи проходит перекачивание более прохладного воздуха через оконные проемы со стороны теневых помещений в сторону солнечных, включая использование эффективной системы термогравитационной вентиляции. Этот процесс аэрации помещений продолжается до тех пор, пока не устанавливается термический баланс между неравномерно нагреваемыми стеновыми конструкциями и помещениями. Температура воздуха в помещениях северной ориентации в течение светового дня остается в пределах комфортного уровня, поскольку они не подвержены прямому солнечному воздействию. В этом случае воздух перекачивается через оконные проемы северного теневого помещения в сторону южного, облучаемого помещения. При инфильтрационных и эксфильтрационных процессах скорость воздуха в помещениях составляет 1,0–1,5 м/с, что определяет эффективность системы термогравитационной вентиляции в квартирах жилых зданий.

Определены условия инсоляции зданий различной ориентации и количество тепла, вносимого солнечной энергией в теплый период года, что является важным фактором, формирующим тепловую среду с температурами воздуха в помещениях до 32–34 °С. При возникновении теплового дискомфорта во внутренней среде естественная аэрация, обусловленная тепловым напором и охлаждающим эффектом движущегося воздуха в квартирах, играет значительную роль в определении теплового состояния человека. Результативность этих процессов представлена в табл. 2, 3.

Табл. 2. Схемы ориентации зданий и проветривания квартир
Table 2. Building orientation and apartment aeration patterns

Принцип проветривания Aeration principle	Графическое изображение схемы проветривания Graphic representation of the aeration pattern	Характеристика Characteristic	Эффективность Efficiency
Одностороннее в меридиональных сечениях One-way aeration in meridional sections		Принцип работы естественной приточно-вытяжной вентиляции основан на эффекте конвекции за счет оконных проемов, расположенных в плоскости одной стены, и энергоактивности пластики фасадов The operating principle of natural supply and exhaust ventilation is based on the effect of convection due to window openings located in the plane of one wall, as well as the energy activity of the facade shape	Низкое Low
Сквозное и угловое в торцевых сечениях Through and angular in the end sections		Принцип работы естественной приточно-вытяжной вентиляции основан на эффекте конвекции за счет оконных проемов, расположенных в плоскости взаимно перпендикулярных стен The operating principle of natural supply and exhaust ventilation is based on the convection effect due to window openings located in the plane of mutually perpendicular walls	Среднее Medium

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 10, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 10, 2025

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

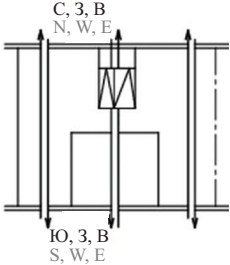
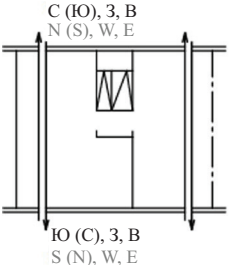
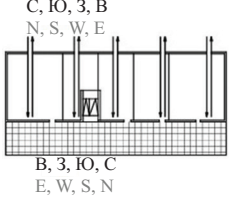
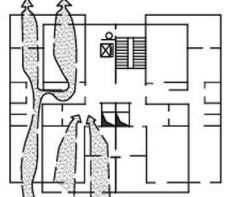
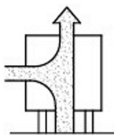
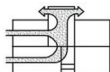
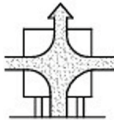
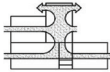
Принцип проветривания Aeration principle	Графическое изображение схемы проветривания Graphic representation of the aeration pattern	Характеристика Characteristic	Эффективность Efficiency
Сквозное больших и через лестничную клетку малых квартир в широтных секциях ограниченной ориентации Through aeration of large apartments and aeration of small apartments through the stairwell in latitudinal sections of the limited orientation		Принцип работы естественной приточно-вытяжной вентиляции основан на эффекте конвекции за счет оконных проемов, расположенных в плоскости противоположных стен The operating principle of natural supply and exhaust ventilation is based on the convection effect due to window openings located in the plane of opposite walls	Хорошее Good
Сквозное в широтных секциях неограниченной ориентации Through aeration in latitudinal sections of unlimited orientation		Принцип работы естественной приточно-вытяжной вентиляции основан на эффекте конвекции за счет оконных проемов, расположенных в плоскости противоположных стен The operating principle of natural supply and exhaust ventilation is based on the convection effect due to window openings located in the plane of opposite walls	Хорошее Good
Сквозное в галерейных домах Through aeration in gallery houses		Принцип работы естественной приточно-вытяжной вентиляции основан на эффекте конвекции за счет оконных проемов, расположенных в плоскости противоположных стен The operating principle of natural supply and exhaust ventilation is based on the convection effect due to window openings located in the plane of opposite walls	Хорошее Good
Сквозное и вертикальное проветривание Through and vertical aeration		Принцип работы естественной приточно-вытяжной вентиляции основан на эффекте конвекции за счет оконных проемов, расположенных в плоскости противоположных стен и вентиляционных шахт The operating principle of natural supply and exhaust ventilation is based on the convection effect due to window openings located in the plane of opposite walls and ventilation shafts	Среднее Medium

Табл. 3. Классификация проветривания жилой квартиры

Table 3. Classified aeration in a residential apartment

Характеристика проветривания Aeration characteristics		Графическое изображение проветривания Graphic representation of aeration	Схема проветривания Aeration pattern		
с учетом принципа действия taking into account the principle of operation	с учетом расположения проемов taking into account the location of openings		Комнаты Rooms		Квартиры Apartments
			непосредственное direct	опосредственное indirect	
Горизон- тальное Horizontal	Боковое Г–Б Lateral H–L				
	Угловое Г–У Angular H–A				
	Сквозное Г–С Through H–T				
Верти- кальное Vertical	Боковое В–Б Lateral V–L		–	–	–
	Угловое В–У Angular V–A				
	Сквозное В–С Through V–T		–	–	–
Горизон- тальное + вертикаль- ное Horizontal + vertical	Г–Б + В–Б Г–У + В–Б H–L + V–L H–A + V–L				
	Г–Б + В–У Г–У + В–У Г–С + В–Б Г–С + В–У H–L + V–A H–A + V–A H–T + V–L H–T + V–A		–		

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 10, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 10, 2025

Характеристика проветривания Aeration characteristics		Графическое изображение проветривания Graphic representation of aeration	Схема проветривания Aeration pattern		
с учетом принципа действия taking into account the principle of operation	с учетом расположения проемов taking into account the location of openings		Комнаты Rooms		Квартиры Apartments
			непосредственное direct	опосредственное indirect	
Горизон- тальное + вертикаль- ное Horizontal + vertical	Г –Б + В–С Г–У + В–С Н–L + V–T Н–А + V–T		–	–	
	Г–С + В–С Н–Т + V–T		–	–	

Примечание: Г — горизонтальное; Б — боковое; У — угловое; С — сквозное; В — вертикальное.

Note: H is horizontal; L is lateral; A is angular; T is through; V is vertical.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа проведенных исследований установлено, что термогравитационный вид вентиляции является пассивным, он используется при тепловом напоре в штилевых условиях для естественной вентиляции помещений здания. В то же время это наиболее простой, дешевый, а поэтому распространенный способ пассивного охлаждения и вентиляции помещений.

Эффективность системы термогравитационной вентиляции при проектировании и эксплуатации зданий напрямую зависит от множества факторов, включая как архитектурно-строительные особенности, так и климатические условия. Оптимизация работы системы аэрации квартир и помещений требует комплексного подхода и внимательного учета следующих аспектов: ориентация зданий, планировочное решение квартиры и помещений, высота помещений, расположение и размеры вентиляционных отверстий, каналов и оконных блоков, устройства фрамуг и форточек и прочего.

Выявлено, что в городах с продолжительными периодами малых ветровых и штилевых условий термогравитационная вентиляция является эффективным решением для поддержания комфортного воздушного режима в зданиях. Это решение способствует снижению энергозатрат и улучшению качества воздуха в помещениях, что непосредственно связано с решением проблемы экологии жилища. Особенно эффективна термогравитационная венти-

ляция в зданиях с низкими потребностями в вентиляции, а также в тех климатических условиях, где температурные различия между внутренним и наружным воздухом значительно выражены. В таких случаях конвективный поток в пристенном слое воздуха становится основным средством обеспечения проветривания помещений созданием воздушного потока без применения внешних энергозатрат.

Разработано теоретическое положение термогравитационной вентиляции зданий, которое позволяет прогнозировать естественную аэрацию квартир в жилых зданиях. Это положение основывается на принципах термогравитационной вентиляции, использующих температурные различия для создания воздушных потоков, что делает систему особенно эффективной в определенных климатических условиях и архитектурных решениях.

Установлены положительные предпосылки термогравитационной вентиляции помещений за счет теплового напора:

- автономная работа;
 - сочетание вентиляции при ветровом напоре;
 - основывается на естественных климатических принципах;
 - высокая эффективность в экстремальных штилевых условиях;
 - экономия энергоресурсов.
- Недостатки:
- необходимость температурной разницы;
 - зависит от силы и направления ветра;

- риск загрязнения поступающего воздуха;
- возможность загрязненного поступающего воздуха извне;
- меньшая эффективность по сравнению с ветровой вентиляцией.

В целом термогравитационная вентиляция является эффективным и экологически чистым реше-

нием для обеспечения естественного воздухообмена в жилых зданиях, особенно в условиях маловетреной погоды и штилей. Однако ее эффективность может зависеть от ряда факторов, включая температурные колебания, скорость ветра и качество внешнего воздуха, которые должны учитываться на этапе проектирования жилых зданий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Эльтерман В.М. Вентиляция химических производств. М. : Книга по Требованию, 2021. 284 с.
2. Табунчиков Ю.А., Бродач М.М., Шилкин Н.В. Энергоэффективные здания. М. : АВОК-пресс, 2015. 193 с.
3. Гиясов А.И., Мирзоев С.М., Абдулрахман К. Моделирование тепло-ветровых процессов пристенного слоя ограждающих конструкций зданий при инсоляции // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 3. С. 285–297. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.285-297. EDN ICZMOO.
4. Голенков А.В. Проблемы использования естественной вентиляции в жилых домах // Инновации в строительстве – 2022 : мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2022. С. 108–109. EDN EUYNQJ.
5. Giyasov A.I., Mirzoev S.M. Innovative facade systems for buildings in hot climate conditions // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263. P. 04009. DOI: 10.1051/e3sconf/202126304009
6. Maher D., Hana A., Arjmand J.T., Issakhov A., Sammouda H., Sheremet M. et al. Effect of inlet/outlet on thermal performance of naturally ventilated building // International Journal of Low-Carbon Technologies. 2021. Vol. 16. Issue 4. Pp. 1348–1362. DOI: 10.1093/ijlct/ctab055
7. Таймасов С.Р. Система вентиляции жилого дома // Дневник науки. 2023. № 1 (73). EDN IZYVCI.
8. Zhangabay N., Giyasov A., Ibraimova U., Tursunkululy T., Kolesnikov A. Construction and climatic certification of an area as a prerequisite for development of energy-efficient buildings and their external wall constructions // Construction Materials and Products. 2024. Vol. 7. Issue 5. DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-5-1
9. Rezaeiha A., Montazeri H., Blocken B. On the accuracy of turbulence models for CFD simulations of vertical axis wind turbines // Energy. 2019. Vol. 180. Pp. 838–857. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.053
10. Awbi H.B., Hatton A. Natural convection from heated room surfaces // Energy and Buildings. 1999. Vol. 30. Issue 3. Pp. 233–244. DOI: 10.1016/S0378-7788(99)00004-3
11. Гиясов А.И., Мирзоев С.М. Модель тепло-ветрового режима наружных стен зданий с жалюзийным солнцезащитным устройством // Строительство и реконструкция. 2024. № 1 (111). С. 3–13. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-111-1-3-13. EDN PPVLEY.
12. Федоров В.В., Федоров М.В., Левиков А.В., Ханыгин Д.А. Оптимизация воздушно-теплого режима реконструируемых зданий // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2020. № 1 (5). С. 38–44. EDN JFCJFT.
13. Клеверова В., Бакиржанкызы А. Теплообмен при свободной конвекции // Global Science and Innovations: Central Asia. 2021. Т. 7. № 1 (12). С. 111–115. EDN UNLHGX.
14. Zhangabay N., Bakhbergen S., Aldiyarov Zh., Tursunkululy T., Kolesnikov A. Analysis of thermal efficiency of external fencing made of innovative ceramic blocks // Construction Materials and Products. 2024. Vol. 7. Issue 3. DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-3-1. EDN ICGQRW.
15. Бодров М.В., Кузин В.Ю., Прыткова Е.М., Юланова А.Ф. О факторах эффективной работы систем естественной вентиляции // Жилищное строительство. 2022. № 1–2. С. 3–8. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-1-2-3-8. EDN WBCKAK.
16. Рымаров А.Г., Хаванов П.А., Титков Д.Г. Основы формирования локальных температурных зон в помещении // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2021. № 1. С. 54–63. EDN CZSMHQ.
17. Mingotti N., Chenvidyakarn T., Woods A.W. The fluid mechanics of the natural ventilation of a narrow-cavity double-skin façade // Building and Environment. 2011. Vol. 46. Issue 4. Pp. 807–823. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.09.015
18. Береговой А.М., Шурыгин И.С. Мероприятия по тепловой защите зданий и энергосбережение в системе естественной вентиляции помещений // Вестник ПГУАС: Строительство, наука и образование. 2023. № 2 (17). С. 4–8. EDN LHPHIR.
19. Фам Тхи Хонг Тхам, Соловьев А.К., Корнеев С.С. A field study on effects of openings on thermal performance of natural cooling efficiency for atrium buildings // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 2. С. 149–158. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.2.149-158
20. Клявлин М.С., Халфина Д.А., Клявлиня Я.М., Талипов Р.А. Проектирование систем вентиляции зданий с учетом влияния воздухопроницаемости ограждающих конструкций // Электронный науч-

ный журнал Нефтегазовое дело. 2020. № 2. С. 26–38. DOI: 10.17122/ogbus-2020-2-26-38. EDN OFNVZR.

21. Шилкин Н.В., Бродач М.М., Шонина Н.А. Регулируемые приточные устройства в квартирах многоэтажных жилых зданий // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, тепло-снабжение и строительная теплофизика. 2022. № 7. С. 22–31. EDN PBYLSS.

22. Nemova D.V., Kotov E.V., Daurov Z.S., Olsheskiy V.Ia. Energy Efficiency of Closed Cavity Facades // Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. Vol. 93. Issue 8. P. 9305. DOI: 10.18720/CUBS.93.5. EDN LOQOLU.

23. Шилкин Н.В., Бродач М.М. Проветривание квартир: архитектурно-планировочные решения и выбор оптимального режима // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, тепло-снабжение и строительная теплофизика. 2022. № 2. С. 34–39. EDN OYDPJC.

24. Al-Dumaini O.A.H.Sh., Velichkin V.A. Development of a mathematical model for testing the natural ventilation: a case study for the yemeni residents // Engineering Journal of Don. 2024. No. 6 (114). Pp. 595–605. EDN DTBOEW.

25. Петтер Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика. М. : Стройиздат, 1984. 294 с.

Поступила в редакцию 21 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 12 августа 2025 г.

Одобрена для публикации 12 августа 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: Адхам Иминжанович Гиясов — доктор технических наук, профессор; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 979847, Scopus: 57202817395, ResearcherID: T-8804-2018, ORCID: 0000-0002-2471-5065; adham52@mail.ru.

REFERENCES

1. Elterman V.M. *Ventilation of food products*. Moscow, Book on Demand, 2021; 284. (rus.).

2. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M., Shilkin N.V. *Energy-efficient buildings*. Moscow, AVOK-press, 2015; 193. (rus.).

3. Giyazov A.I., Mirzoev S.M., Abdulrahman K. Modeling thermal and wind processes in the near-wall layer of building envelopes subjected to insolation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(3):285-297. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.285-297. EDN ICZMOO. (rus.).

4. Golenkov A.V. Problems of using natural ventilation in residential buildings. *Innovations in construction – 2022 : proceedings of the international scientific and practical conference*. 2022; 108-109. EDN EUYNQJ. (rus.).

5. Giyasov A.I., Mirzoev S.M. Innovative facade systems for buildings in hot climate conditions. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:04009. DOI: 10.1051/e3sconf/202126304009

6. Maher D., Hana A., Arjmand J.T., Issakhov A., Sammouda H., Sheremet M. et al. Effect of inlet/outlet on thermal performance of naturally ventilated building. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 2021; 16(4):1348-1362. DOI: 10.1093/ijlct/ctab055

7. Taymasov S.R. Residential house ventilation system. *Science Diary*. 2023; 1(73). EDN IZYVCI. (rus.).

8. Zhangabay N., Giyasov A., Ibraimova U., Tursunkululy T., Kolesnikov A. Construction and climatic certification of an area as a prerequisite for development

of energy-efficient buildings and their external wall constructions. *Construction Materials and Products*. 2024; 7(5). DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-5-1

9. Rezaeiha A., Montazeri H., Blocken B. On the accuracy of turbulence models for CFD simulations of vertical axis wind turbines. *Energy*. 2019; 180:838-857. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.053

10. Awbi H.B., Hatton A. Natural convection from heated room surfaces. *Energy and Buildings*. 1999; 30(3):233-244. DOI: 10.1016/S0378-7788(99)00004-3

11. Giyasov A.I., Mirzoev S.M. Model of heat-wind regime of building walls with lout sun protection device. *Building and Reconstruction*. 2024; 1(111):3-13. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-111-1-3-13. EDN PPVLEY. (rus.).

12. Fedorov V.V., Fedorov M.V., Levikov A.V., Hanygin D.A. Optimization of the air-heating mode reconstructed buildings. Bulletin of Tver State Technical University. Series: Construction. *Electrical engineering and chemical technologies*. 2020; 1(5):38-44. EDN JFCJFT. (rus.).

13. Klewerova V., Bakirzhankyzy A. Heat transfer during free convection. *Global Science and Innovations: Central Asia*. 2021; 7(1):(12):111-115. EDN UNLHGX. (rus.).

14. Zhangabay N., Bakhbergen S., Aldiyarov Zh., Tursunkululy T., Kolesnikov A. Analysis of thermal efficiency of external fencing made of innovative ceramic blocks. *Construction Materials and Products*. 2024; 7(3). DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-3-1. EDN ICGQRW.

15. Bodrov M.V., Kuzin V.Y., Prytkova E.M., Yulanova A.F. On the factors of effective operation of natural ventilation systems. *Housing Construction*. 2022; 1-2:3-8. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-1-2-3-8. EDN WBCKAK. (rus.).
16. Rymarov A.G., Khavanov P.A., Titkov D.G. Fundamentals of the formation of local temperature zones in a room. *AVOK*. 2021; 1:54-63. EDN CZSMHQ. (rus.).
17. Mingotti N., Chenvidyakarn T., Woods A.W. The fluid mechanics of the natural ventilation of a narrow-cavity double-skin façade. *Building and Environment*. 2011; 46(4):807-823. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.09.015
18. Beregovoy A.M., Shurygin I.S. Measures for thermal protection of buildings and energy saving in the system of natural ventilation of rooms. *PGUAS Bulletin: construction, science and education*. 2023; 2(17):4-8. EDN LHPHIR. (rus.).
19. Hong-Tham T. Pham, Solovyev A.K., Korneev S.S. A field study on effects of openings on thermal performance of natural cooling efficiency for atrium buildings. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and s Architecture]*. 2022; 17(2):149-158. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.2.149-158 (rus.).
20. Klyavlin M.S., Khalfina D.A., Klyavlina Ya.M., Talipov R.A. Design of building ventilation systems taking into account the influence of air permeability of fencing constructions. *Oil and Gas Business*. 2020; 2:26-38. DOI: 10.17122/ogbus-2020-2-26-38. EDN OFNVZR. (rus.).
21. Shilkin N.V., Brodach M.M., Shonin N.A. Adjustable supply devices in apartments of multi-storey residential buildings. *AVOK*. 2022; 7:22-31. EDN PBYLSS. (rus.).
22. Nemova D.V., Kotov E.V., Daurov Z.S., Olsheskiy V.Ia. Energy Efficiency of Closed Cavity Fasad. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020; 93(8):9305. DOI: 10.18720/CUBS.93.5. EDN LOQOLU.
23. Shilkin N.V., Brodach M.M. Ventilation of apartments: architectural and planning solutions and selection of the optimal mode. *AVOK*. 2022; 2:34-39. EDN OYDPJC. (rus.).
24. Al-Dumaini O.A.H.Sh., Velichkin V.A. Development of a mathematical model for testing the natural ventilation: a case study for the yemeni residents. *Engineering Journal of Don*. 2024; 6(114):595-605. EDN DTBOEW.
25. Retter E.I. *Architectural and construction aerodynamics*. Moscow, Stroyizdat, 1984; 294. (rus.).

Received March 21, 2025.

Adopted in revised form on August 12, 2025.

Approved for publication on August 12, 2025.

BIONOTES: **Adham I. Giyazov** — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9800-5187, ID RSCI: 979847, Scopus: 57202817395, ResearcherID: T-8804-2018, ORCID:0000-0002-2471-5065; adham52@mail.ru.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 334.7

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1596-1608

Подход к формированию показателей оценки результативности управления кампусами на принципах государственно-частного партнерства

Наталья Григорьевна Верстина, Ольга Олеговна Донская

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие современных кампусов университетов в рамках федерального проекта «Создание сети современных кампусов» проводится с применением механизма государственно-частного партнерства (ГЧП), в котором кампус рассматривается как многоуровневая социально-экономическая система, одновременно создающая образовательную, научно-технологическую и предпринимательскую ценность. Эффективность управления такой системой может быть доказана через комплексную систему показателей, способную объективно отражать результативность управления одновременно тремя прямыми участниками: публичным партнером в лице регионального правительства, частным партнером в лице инвестора проекта и университетом в достижении общих стратегических целей проекта.

Материалы и методы. Цель исследования — разработка подхода к определению комплекса показателей оценки результативности совместной деятельности участников управления кампусом в проектах с применением механизма ГЧП с учетом интересов публичного партнера, частного партнера и университета. Использованы методы нормативно-правового анализа, сравнительного кейс-стади опыта создания зарубежных и отечественных кампусов университетов, контент-анализа российских и зарубежных публикаций.

Результаты. Анализ существующих подходов продемонстрировал переход фокуса управления кампусом от материально-технической базы к процессам формирования конкурентных преимуществ в результате деятельности, осуществляемой в границах кампуса. Обоснована применимость продуктивно-сервисного подхода для достижения конкурентоспособности кампуса, которая устанавливается качеством разработанного продуктового портфеля с учетом целей развития, потенциала и компетенций регионального правительства, частного инвестора и университета. Предложен подход к определению комплекса показателей, который позволяет оценивать результативность совместного управления кампусом, сопоставлять академические, инфраструктурные и региональные социально-экономические эффекты, оперативно выявлять диспропорции в целевой продуктовой модели развития кампуса и тем самым обосновывать управленческие решения, направленные на баланс интересов участников управления для достижения аналитических показателей оценки кампуса, заложенных в федеральном проекте. Разработанный подход может использоваться при проектировании комплекса показателей отдельных проектов кампусов, реализуемых при помощи механизма ГЧП как инструмента управления совместной деятельностью, содействуя возврату инвестиций, достижению академических целей и повышению региональных социально-экономических эффектов.

Выводы. Конкурентоспособность кампуса, реализованного с применением ГЧП, равна конкурентоспособности его продуктового портфеля, формирующегося на пересечении трех взаимозависимых контуров — деятельности университета, качества инфраструктуры и потенциала региона. Достижение конкурентоспособности продуктового портфеля происходит через управление процессами создания конкурентных преимуществ, в которых одновременно задействованы все прямые участники управления — публичный партнер, частный партнер и университет.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кампус, государственно-частное партнерство, система показателей, сервисно-продуктовый подход, управление, региональное развитие

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Верстина Н.Г., Донская О.О. Подход к формированию показателей оценки результативности управления кампусами на принципах государственно-частного партнерства // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 10. С. 1596–1608. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1596-1608

Автор, ответственный за переписку: Ольга Олеговна Донская, o.donskaya@gmail.com.

Defining performance metrics for campus management based on public-private partnership principles

Natalia G. Verstina, Olga O. Donskaya

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

ABSTRACT

Introduction. Within the federal programme “Creating a Network of Modern University Campuses” new campuses are being developed through public-private partnerships (PPP). A campus is treated as a multi-level socio-economic system that simultaneously generates educational, scientific-technological and entrepreneurial value. The effectiveness of managing such a system can be demonstrated only through an integrated indicator framework that objectively captures the performance of the three primary actors — the public partner, the private partner and the university — in pursuing the project’s shared strategic goals.

Materials and methods. The aim of this study is to develop an approach for defining a set of performance metrics to evaluate the effectiveness of joint campus management in projects implemented through public-private partnership mechanisms, taking into account the interests of the public partner, private partner and the university. The research employs methods of legal and regulatory analysis, comparative case studies of domestic and international university campuses and content analysis of Russian and international publications.

Results. The analysis of existing approaches reveals a shift in campus management focus — from physical infrastructure to the creation of competitive advantages stemming from activities carried out within the campus. The applicability of the product-service approach to achieving campus competitiveness is justified, which is determined by the quality of the developed product portfolio, taking into account the development goals, potential and competencies of the regional government, private investor and university. The study proposes an approach to defining a set of metrics that enables the evaluation of joint campus management performance, comparison of academic, infrastructural, and regional socio-economic outcomes, timely identification of imbalances in the target product development model and justification of managerial decisions aimed at aligning stakeholder interests. The developed approach can be applied in the design of metric systems for individual PPP-based campus projects, serving as a management tool that supports investment return, achievement of academic goals and enhancement of regional socio-economic impact.

Conclusions. The competitiveness of a PPP-based campus equals the competitiveness of its product portfolio, shaped at the intersection of three interdependent domains: university operations, infrastructure quality and regional potential. Achieving product portfolio competitiveness requires managing processes that generate competitive advantages through the coordinated efforts of all key stakeholders — the public partner, private partner, and the university.

KEYWORDS: campus, public-private partnership, indicator system, service and product approach, management, regional development

FOR CITATION: Verstina N.G., Donskaya O.O. Defining performance metrics for campus management based on public-private partnership principles. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(10):1596-1608. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1596-1608 (rus.).

Corresponding authors: Olga O. Donskaya, o.donskaya@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Запуск федерального проекта «Создание сети современных кампусов» ознаменовал переход от традиционного бюджетного финансирования к привлечению частных инвестиций в развитии инфраструктуры университетов через применение механизма государственно-частного партнерства (ГЧП), зафиксированного в Постановлении Правительства Российской Федерации от 28.07.2021 № 1268 «О реализации проекта по созданию инновационной образовательной среды (кампусов) с применением механизмов государственно-частного партнерства и концессионных соглашений в рамках федерального проекта “Развитие инфраструктуры для научных исследований и подготовки кадров” национального проекта “Наука и университеты”». Механизм ГЧП подразумевает участие в управлении кампусом нескольких прямых участников: публичного партнера в лице субъекта Российской Федерации, частного партнера в лице инвестора проекта и университета (в отдельных случаях консорциума университетов).

Привлечение частного капитала в социальную инфраструктуру повышает скорость модернизации и снижает нагрузку на федеральный бюджет, что подтверждается ростом объема концессионных соглашений в образовательном секторе¹. Одновре-

менно оно усиливает требования к инвестиционной привлекательности кампуса, побуждая заинтересованных участников выстраивать продуктивно-сервисную модель, способную генерировать устойчивый денежный поток.

Согласно «Стандарту инновационной образовательной среды (кампусов)» социально-экономические эффекты и аналитические показатели кампусов затрагивают национальный, институциональный уровень и уровень субъектов РФ и концентрируются преимущественно на академических метриках университетов, а также социально-экономических показателей регионального развития, оставляя в стороне показатели, которые отражали бы привлекательность кампуса как инвестиционного проекта для привлечения частных партнеров, что создает риск несогласованности стратегических приоритетов участников управления². Центральной научной проблемой становится определение подхода к формированию комплекса показателей, позволяющего оценить результативность совместной деятельности всех сторон в рамках модели ГЧП.

В настоящем исследовании предлагается решать указанную проблему через исследование понятия конкурентоспособности и подходов к ее оценке, рассматривая конкурентоспособность как обяза-

¹ На ПМЭФ подписаны концессионные соглашения о создании кампусов в 5 регионах. URL: <https://forumspb.com/news/news/na-pmef-podpisany-kontsessiionnye-soglasheniya-o-sozdanii-kampusov-v-5-regionah/>

² Приложения № 36–46 к распоряжению Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 237-п. URL: https://minobrnauki.gov.ru/upload/2023/06/237-%D1%80%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BB-2036-46_.pdf

тельное условие, которое учитывает приоритеты и способствует достижению задач управления трех прямых участников. В данной работе конкурентоспособность кампуса достигается через применение продуктивно-сервисного подхода с последующим созданием и управлением продуктовым портфелем кампуса, где объединяются три взаимозависимых контура — деятельность университета, качество инфраструктуры и потенциал региона. Такой ракурс показывает, что частный партнер в проекте выступает не только источником финансирования процесса создания инфраструктуры, но и участником разработки продуктового портфеля и оператором его реализации с непрерывным мониторингом ключевых метрик кампуса [1]; именно поэтому акцент смещается с оценки по статичным рейтингам на динамическое отслеживание процессов, формирующих конкурентные преимущества.

В настоящее время исследования управления университетскими кампусами консолидируются вокруг взаимосвязанных методологических линий — *институционально-экономической, предпринимательской и инфраструктурной* — каждая из которых рассматривает кампус как стратегический актив, способный формировать конкурентоспособность как самого университета, так и принимающего региона.

Институционально-экономическая перспектива делает ставку на ГЧП, работы российских авторов (И.М. Шор, Т.Ф. Романовой, С.Н. Меликсетян, А.Д. Бакшеевой, А.А. Митряшкиной) показывают, что ГЧП позволяет модернизировать инфраструктуру без чрезмерного давления на бюджет, однако сталкивается с проблемами справедливого распределения рисков и отсутствия долгосрочного мониторинга. Зарубежные модели оценки проектов ГЧП в сфере высшего образования (J. Kim, M. Han, S. Sikombe, F. Muleya, J. Phiri) детализируют этап эксплуатации, подчеркивая необходимость комплексных KPI, охватывающих как финансовую устойчивость объектов, так и их общественное значение.

Предпринимательская школа (A. Kovacs, I. Levai, G. Dalmarco, W. Hulsink, M.F. Arroyabe) трактует кампус как площадку для инноваций и коммерциализации научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР). Зарубежные исследования фиксируют, что наличие акселераторов, доля стартапов и объем доходов от лицензирования выступают ключевыми индикаторами результативности, а российские авторы (Е.С. Ивукина, Н.А. Николаева) подчеркивают важность «предпринимательского» пространственного дизайна.

Пространственно-архитектурные и урбанистические подходы рассматривают кампус как элемент городского развития и фактор «гения места». Зарубежные практики многополюсного планирования (S. Elena-Pérez, E. Arregui-Pabollet) дополняются российскими исследованиями (Н.Х.Н. Алкаиф, С.В. Пригаро) роли кампусов в малых городах и ди-

намики студенческих потоков. Однако связь между планировочными решениями, финансовой моделью и социальным капиталом местного сообщества остается преимущественно описательной и требует количественных подтверждений.

Вопрос показателей результативности кампуса распределен между академическими, экономическими и социальными метриками. Методы комбинированного взвешивания позволяют оценить эффективность инфраструктурных проектов ГЧП в сфере высшего образования, а отдельные российские работы (С.Н. Костин, К.Е. Франгулян) анализируют готовность кампусов к цифровой трансформации и ее влияние на конкурентоспособность. При этом академические показатели описаны детально, тогда как интегрированные индикаторы, отражающие интересы частного инвестора и региона, систематизированы слабо.

Анализ литературы показывает сдвиг от эксплуатационного менеджмента к стратегическому партнерству, но демонстрирует фрагментарность показателей: академические, инвестиционные и региональные логики учета пока не сведены в единую систему. Научные пробелы концентрируются на разработке интегрированного набора показателей, одинаково релевантного университету, частному инвестору и региону, а также на включении устойчивости и цифровой трансформации в финансовые модели развития кампусов университетов.

Таким образом, цель статьи заключается в разработке подхода к определению комплекса показателей для оценки результативности совместной деятельности участников управления кампусом в ГЧП-проектах с позиции всех заинтересованных сторон, а научная новизна — в обосновании решающего влияния конкурентоспособности продуктового портфеля на достижение целевых эффектов федерального проекта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование опирается на три взаимодополняющих блока методов. Проведен нормативно-правовой анализ базовых документов: Стандарта инновационной образовательной среды (кампусов), паспорта федерального проекта и федеральных законов № 115-ФЗ и 224-ФЗ о концессионных соглашениях и ГЧП.

Применен контент-анализ отечественной и зарубежной научной литературы по управлению ГЧП-проектами в образовательной и социальной сферах.

Результат анализа позволил систематизировать пять доминирующих концептуальных школ — *entrepreneurial university, resource-based view, dynamic capabilities, public capital* и *Porter's diamond/cluster* — и тем самым обрисовать многофакторную природу конкурентоспособности кампуса.

Для построения системы оценки результативности управления кампусом, реализуемой в форма-

те государственно-частного партнерства, применен метод *содержательного и структурно-категориального анализа*:

- на первом этапе исследования выполнен контент-анализ 50 отечественных и зарубежных научных публикаций, а также нормативных документов, включая «Стандарт инновационной образовательной среды (кампусов)», паспорта федерального проекта «Создание сети современных кампусов» и типовые концессионные соглашения. Целью анализа было выявление устойчиво применяемых и валидируемых в различных контекстах индикаторов оценки эффективности кампусов;
- на основе собранной базы структурирована многоуровневая система из 113 показателей, сгруппированных по трем ключевым направлениям: конкурентоспособность университета (48 показателей), конкурентоспособность инфраструктуры (33 показателя), конкурентоспособность региона (32 показателя).

Полученная структура подходов и показателей создает исследовательскую базу для дальнейшей разработки подхода к формированию комплекса показателей оценки результативности совместной деятельности участников управления кампусом, опираясь на факторы конкурентоспособности продуктового портфеля кампуса в зависимости от его

состава, региона присутствия, места расположения, ресурсной и компетентностной базы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Реализация проектов образования современных кампусов с использованием механизма ГЧП предусматривает, что государственная сторона в лице регионального правительства и университетов «сосредоточена на обновлении инфраструктуры и создании современных условий для инноваций в сфере высшего образования и научной деятельности, включая новые формы совместной деятельности университетов в виде создания не юридических консорциумов, а также необходимости осуществления в кампусе не только академической, но и социальной, культурной и экономической функций» [2, 3]. Частная сторона сосредоточена на инвестиционной окупаемости, а именно способности генерировать достаточный доход или экономический эффект, чтобы покрыть первоначальные инвестиции и обеспечить прибыль в долгосрочной перспективе.

При этом возникает новая управленческая ситуация, где применение механизма ГЧП на этапе создания и управления кампусом формирует условия, при которых участники управления кампусом, обладая собственными стратегическими приорите-



Рис. 1. Ключевые показатели конкурентоспособности кампуса

Fig. 1. Key Campus Competitiveness Metrics

Теоретические подходы к конкурентоспособности
Theoretical Approaches to Competitiveness

Университет / University	Инфраструктура / Infrastructure	Регион / Region
Предпринимательский университет: переход от классической модели к активному игроку инновационного рынка. Показатели: • стартапы студентов/сотрудников; доход от коммерциализации НИОКР [14]; • наличие акселератора [15] Entrepreneurial university: transition from the classical model to an active player in the innovation market. Indicators: • start-ups by students/employees; income from commercialization of R&D [14]; • availability of an accelerator [15]	Public Capital Theory: инфраструктура как общественный капитал, определяющий эффективность экономики. Показатели: • индекс обновления зданий; • площадь на одного студента; • специализированные лаборатории Public Capital Theory: infrastructure as public capital that determines economic efficiency. Indicators: • building renovation index; • area per student; • specialized laboratories	Porter’s Diamond: система факторных условий, спроса и конкуренции. Показатели: • уровень образования населения [16]; • инвестиции в инфраструктуру; рейтинг инвестиционного климата [17] Porter’s Diamond: a system of factor conditions, demand and competition. Indicators: • level of education of the population [16]; • investment in infrastructure; • investment climate rating [17]
Resource-Based View: уникальные внутренние ресурсы как источник преимущества. Показатели: • публикации Q1; • патенты/гранты; • квалификация профессорско-преподавательского состава (ППС) Resource-Based View: unique internal resources as a source of advantage. Indicators: • Q1 publications; • patents/grants; • qualifications of teaching staff	Institutional Theory: роль формальных правил и процедур во владении и эксплуатации ресурсов. Показатели: • прозрачность управления ресурсами; • эффективность внутреннего контроля Institutional Theory: the role of formal rules and procedures in the ownership and exploitation of resources. Indicators: • transparency of resource management; • effectiveness of internal control	Cluster Theory: региональные кластеры как катализатор инноваций. Показатели: • число технопарков и малых и средних предприятий high-tech; • доля совместных проектов вуз – бизнес Cluster Theory: regional clusters as catalysts for innovation. Indicators: • number of technology parks and small and medium-sized high-tech enterprises; • share of joint university – business projects
Dynamic Capabilities: уникальные внутренние ресурсы как источник преимущества. Показатели: • публикации Q1; • патенты/гранты; • квалификация ППС Dynamic Capabilities: unique internal resources as a source of advantage. Indicators: • Q1 publications; • patents/grants; • teaching staff qualifications	Information Systems Theory [18]: информационно-коммуникационные технологии как драйвер эффективности процессов. Показатели: • скорость интернет-доступа; • процент «умных» аудиторий Information Systems Theory [18]: information and communication technologies as a driver of process efficiency. Indicators: • internet access speed; • percentage of “smart” classrooms	Smart Specialization: выявление уникальных траекторий регионального роста [19]. Показатели: • наличие стратегии научно-технологического развития [20]; • участие в федеральных инициативах Smart Specialization: identifying unique regional growth trajectories [19]. Indicators: • existence of a science and technology development strategy [20]; • participation in federal initiatives

тами и осуществляя основную деятельность, вынуждены учитывать взаимные цели и обеспечивать на этой основе совместную деятельность на всех уровнях управления [4]. Для успешной реализации федерального проекта ключевое значение имеет *организация эффективного взаимодействия между участниками управления*.

Результатом совместной деятельности является достижение целевых показателей, установленных федеральным проектом для университетов, а также реализация социально-экономических эффектов для региона и финансово-экономической модели кампуса. Данный подход предполагает, что кампус

должен функционировать и развиваться не только с учетом необходимости обеспечения академической деятельности (что служит приоритетной, но не единственной задачей), но и как источник генерации дохода для частного инвестора и социально-экономических эффектов для региона.

В связи с этим для разработки комплекса показателей оценки совместной деятельности участников управления кампусом требуется выделить ключевое и обязательное условие, обеспечивающее достижение указанной результативности. Авторами обозначена гипотеза, что ключевым условием достижения результативности совместной деятель-

ности участников управления кампусом является конкурентоспособность продуктового портфеля кампуса. Под таким портфелем понимается не только совокупность образовательных, научных, сервисных и инфраструктурных компонентов, но и их способность функционировать как интегрированная система [5], встроенная в региональную экономику, социальную среду и институциональные процессы. Конкурентоспособность портфеля определяется тем, насколько он одновременно отвечает стратегическим задачам университета (академическое качество и инновационность), интересам частного партнера (устойчивый денежный поток и возврат инвестиций) и целям региона (рост человеческого капитала, инвестиционной привлекательности и качества жизни) [6]. Именно эта взаимосвязь и баланс интересов в структуре портфеля образуют гипотезу настоящего исследования: кампус становится эффективным тог-

да, когда управление ориентировано на формирование конкурентных преимуществ на пересечении трех контуров — деятельности университета, качества инфраструктуры и потенциала региона. Эта гипотеза лежит в основе настоящего исследования и определяет его аналитическую рамку.

Контент-анализ отечественных и зарубежных исследований позволил выделить пять доминирующих научных школ, каждая из которых трактует конкурентоспособность по-своему: концепции *entrepreneurial university* [7], *resource-based view* [8] и *dynamic capabilities* [9] описывают университет; *public capital* [1] и *institutional theory* [10] — инфраструктуру; *Porter's diamond* [11], *кластерный подход* [12] и концепция *smart specialization* [13] — регион. Систематизация этих подходов легла в основу таблицы и доказала, что конкурентоспособность кампуса формируется

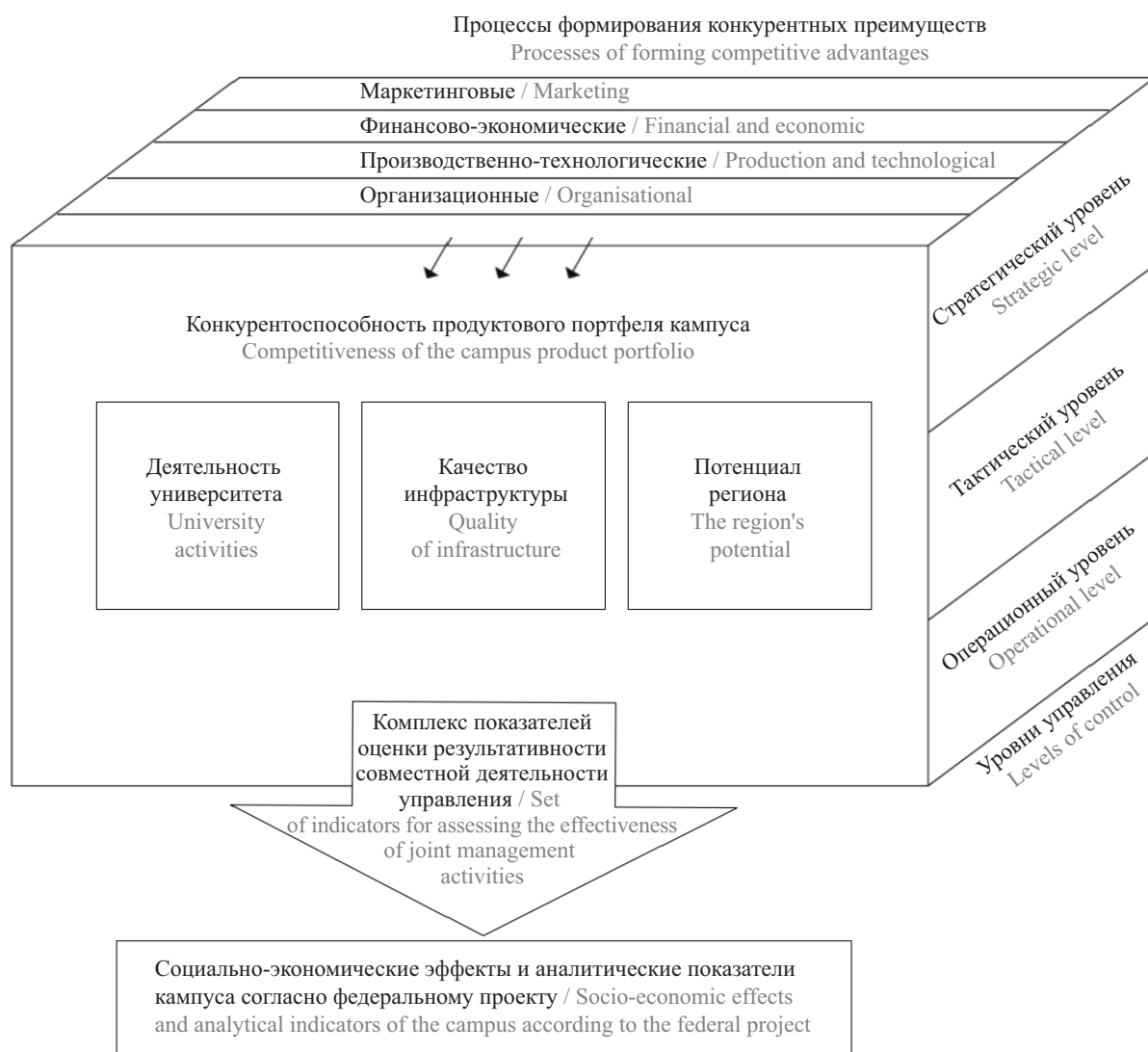


Рис. 2. Подход к формированию комплекса показателей оценки результативности совместной деятельности участников управления кампусом

Fig. 2. Approach to developing a set of indicators for assessing the effectiveness of joint activities by campus management participants

на пересечении трех взаимосвязанных контуров — университета, инфраструктуры и региона.

Для эмпирической проверки выдвинутой гипотезы на базе анализа нормативных документов, научной литературы и практик мониторинга кампусов сформирован расширенный индикаторный массив, включающий 113 показателей, основанный на методе структурно-функционального декомпозиционирования [21, 22]. Все показатели были сгруппированы и проиллюстрированы на рис. 1 по трем уровням — университет, инфраструктура, регион, и распределены по смысловым блокам, отражающим ключевые управленческие зоны: от научно-исследовательской активности и цифровой трансформации до институционального климата и качества жизни [23–48].

Изучение вышеперечисленных подходов к управлению конкурентоспособностью и перечня показателей приводит к выводу, что для создания комплекса показателей оценки результативности совместной деятельности участников управления кампусом как инструмента управления необходимо выделить основные процессы, в которых формируются конкурентные преимущества продуктового портфеля кампуса на стратегическом, тактическом и операционном уровнях управления, а именно маркетинговые, производственно-технологические, финансово-экономические и организационные [21].

Организационные показатели позволяют оценить соответствие состава и взаимосвязей бизнес-процессов целям и задачам функционирования и развития кампуса, установление полномочий и распределение зон ответственности между участниками управления. *Финансово-экономические показатели* направлены на оценку степени достижения инвестиционных показателей финансово-экономической модели кампуса, включающей экономический эффект от реализации продуктов и сервисов продуктового портфеля, качество эксплуатации инфраструктуры кампуса, затраты на управление, а также структуру и объем источников финансирования. *Маркетинговые показатели* направлены на оценку количества и качества групп пользователей кампусом, включая степень удовлетворенности всех групп пользователей, эффективность маркетинговых мероприятий на их привлечение и интенсивность использования инфраструктуры кампуса. *Производственно-технологические показатели* ориентированы на оценку деятельности университетов.

Таким образом, авторский подход к формированию комплекса показателей оценки результативности совместной деятельности участников управления кампусом (рис. 2) дает возможность создать инструмент управления, который приводит к достижению конкурентоспособности продуктового портфеля кампуса и позволяет с большей степенью достигать социально-экономических и аналитических показателей кампусов, заложенных в нормативных документах федерального проекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Целью настоящего исследования было определение и обоснование подхода к формированию комплекса показателей оценки результативности совместной деятельности участников управления кампусами, реализуемых по федеральному проекту «Создание сети современных кампусов» на принципах государственно-частного партнерства. В основе формирования подхода лежала гипотеза о том, что основным условием достижения социально-экономических эффектов и аналитических показателей кампуса, заложенных федеральным проектом на национальном, институциональном уровнях и уровне субъекта РФ, является достижение конкурентоспособности продуктового портфеля кампуса, в котором интегрируются приоритеты университета, региона и частного инвестора. Результаты, полученные на базе нормативного анализа, систематизации зарубежной и российской литературы и панельного изучения кампусов, позволяют сделать следующие выводы.

Установлено, что конкурентоспособность современного кампуса университета представляет собой многоуровневый процесс, который не стоит сводить к статичным показателям или сопоставлению рейтингов. Она формируется на пересечении трех взаимосвязанных контуров — деятельности университета, качества инфраструктуры как среды ее реализации и региона как институционального и экономического контекста [49].

Выявлена необходимость управления конкурентоспособностью через процессы, в которых формируются конкурентные преимущества продуктового портфеля кампуса, а именно маркетинговые, производственно-технологические, финансово-экономические и организационные. В данных процессах осуществляется совместная деятельность управления прямыми участниками — университетом, региональным правительством и частным партнером.

Университет выступает интеллектуальным ядром кампуса, но его конкурентоспособность сегодня определяется не столько числом публикаций, патентов или объемом грантов, сколько способностью конвертировать академические результаты в прикладные инновации, которые масштабируются в экономике региона. Ключевым критерием становится сила взаимных связей «университет – регион»: чем глубже университет встроен в приоритеты региональной стратегии научно-технологического развития, тем выше вероятность, что созданные здесь технологии будут коммерциализированы именно на местной площадке, создавая новые рабочие места, повышая налоговую базу и укрепляя позицию территории в межрегиональной конкуренции за инвестиции и таланты. Эффективное управление университетом, институциональная гибкость, разветвленные индустриальные партнерства и, главное, культура стра-

тегического предпринимательства в академической среде превращают набор внутренних метрик в реальный региональный ресурс [50]. Следовательно, конкурентоспособность университета неразрывно связана с динамикой развития территории: чем активнее регион инвестирует в инфраструктуру, совершенствует институты поддержки инноваций, тем значительнее мультипликативный эффект от университетских достижений.

Обосновано, что инфраструктура в этой системе перестает быть нейтральным фоном. Она — активный участник конкурентной борьбы. Современные кампусы отличаются не столько наличием зданий, сколько способностью этих пространств адаптироваться под новые форматы образования и исследования. Особенно важна цифровая зрелость: наличие цифровых платформ, автоматизированных систем управления обучением, элементов умного кампуса (IoT, мониторинг потоков, автоматизация ресурсов). Кроме того, транспортная доступность и связность кампуса с городской тканью напрямую влияют на его привлекательность для студентов, преподавателей и внешних партнеров.

Однако даже университет, располагающий совершенной инфраструктурой, не способен в полной мере реализовать свой потенциал вне благоприятной

региональной среды. Качество институционально-экономической и социокультурной среды региона во многом предопределяет эффективность кампуса: при отсутствии развитой инновационной политики, достаточной инвестиционной привлекательности и налаженного взаимодействия между университетом, бизнесом и органами власти кампус утрачивает внешние точки роста и рискует оказаться в изоляции. В подобных условиях и наиболее перспективные проекты не находят поддержки, а высококвалифицированные выпускники предпочитают мигрировать.

Перспектива развития рассматриваемой исследовательской темы — взгляд на кампус как на новый институциональный формат для взаимодействия университета и региона с привлечением частных инвестиций и бизнес-компетенций в управлении для формирования потребительской привлекательности.

Таким образом, кампус оказывается по-настоящему конкурентоспособным, потому что представляет собой интегрированную систему, в которой знания превращаются в инновации, среда — в ресурс, а регион — в партнера. Только при наличии этой синергии кампус способен не просто развиваться, а притягивать таланты, капитал и идеи, становясь точкой кристаллизации современного инновационного развития.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пригаро С.В. Подходы и методы управления университетскими кампусами // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2022. № 1 (39). С. 133–139. DOI: 10.52684/2312-3702-2022-39-1-133-139. EDN ESUECL.
2. Шор И.М. Государственно-частное партнерство в российской системе образования: преимущества, проблемы и направления развития // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки. 2022. Т. 7. № 2 (24). С. 153–161. DOI: 10.21603/2500-3372-2022-7-2-153-161. EDN MFCBFP.
3. Митряшкина А.А., Ковалева Т.В. Исследование роли межвузовского кампуса в формировании социальной инфраструктуры региона // Экономика и бизнес: теория и практика. 2023. № 4–2 (98). С. 66–70. DOI: 10.24412/2411-0450-2023-4-2-66-70. EDN YNRNLU.
4. Романова Т.Ф., Меликсетян С.Н. Развитие государственно-частного партнерства в сфере высшего образования // Экономические науки. 2018. № 162. С. 146–151. EDN TYVLF1.
5. Долженко Р.А. Стейкхолдерский подход к развитию нового кампуса вуза // Вестник экономики, права и социологии. 2024. № 3. С. 21–29. DOI: 10.24412/1998-5533-2024-3-21-29. EDN BVXCGV.
6. Kim J., Han M. Education financing and public-private partnership development assistance model // Pro-

- cedia — Social and Behavioral Sciences. 2015. Vol. 177. Pp. 100–103. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.02.345
7. Ивукина Е.С., Николаева Н.А. Предпринимательские университеты как драйверы инновационной деятельности регионов России // Экономика и предпринимательство. 2023. № 6 (155). С. 469–472. DOI: 10.34925/EIP.2023.155.6.078. EDN WYGSSC.
8. Larty J., Jack S., Lockett N. Building regions: a resource-based view of a policy-led knowledge exchange network // Regional Studies. 2017. Vol. 51. Issue 7. Pp. 994–1007. DOI: 10.1080/00343404.2016.1143093
9. Uršič D., Čater T. Digital innovation in management and business: A comprehensive review, multi-level framework, and future research agenda // Journal of Business Research. 2025. Vol. 197. P. 115475. DOI: 10.1016/j.jbusres.2025.115475
10. Cai Y., Mehari Y. The Use of Institutional Theory in Higher Education Research // Theory and Method in Higher Education Research. 2015. Pp. 1–25. DOI: 10.1108/S2056-375220150000001001
11. Tsiligiris V. An Adapted Porter Diamond Model for the Evaluation of Transnational Education Host Countries // International Journal of Educational Management. 2018. Vol. 32. Issue 2. Pp. 210–226. DOI: 10.1108/IJEM-03-2017-0076
12. Ketels C. Recent Research on Competitiveness and Clusters: What Are the Implications for Regional Policy? // Cambridge Journal of Regions, Economy

and Society. 2013. Vol. 6. Issue 2. Pp. 269–284. DOI: 10.1093/cjres/rst008

13. Ольшевская М.В. Управление студенческими кампусами — новации на рынке услуг // Beneficium. 2024. № 4 (53). С. 58–64. DOI: 10.34680/BENEFICIUM.2024.4(53).58-64

14. Николаев В.К., Скворцов А.А. Принципы пространственного развития кампуса предпринимательского университета // ЭКО. 2023. № 5 (587). С. 54–77. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2023-5-54-77. EDN MLATQG.

15. O'Neill M., Bagchi-Sen S. Public Universities and Human Capital Development in the United States // GeoJournal. 2023. Vol. 88. Issue 1. Pp. 733–751. DOI: 10.1007/s10708-022-10636-1

16. Criaco G., Hahn D., Minola T., Pittino D. The Role of Non-Economic Goals in Academic Spin-Offs // The Journal of Technology Transfer. 2025. Vol. 50. Issue 2. Pp. 668–691. DOI: 10.1007/s10961-024-10111-8

17. Jeong Y.-H., Kim Y.-C., Min K.-B. Commercialisation Time and Licensing Performance of University Inventions: The Moderating Role of University Inventors // Technology Analysis & Strategic Management. 2025. Vol. 37. Issue 1. Pp. 35–48. DOI: 10.1080/09537325.2023.2280547

18. Indrayani E. Management of Academic Information System (AIS) at Higher Education in the City of Bandung // Procedia — Social and Behavioral Sciences. 2013. Vol. 103. Pp. 628–636. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.10.381

19. Kovacs A., Levai I., Nagy H. Creation Experience of Startup Campuses in Major Regions (North America, Far East, Australia and Europe) // Regional Economy. South of Russia. 2023. Vol. 11. Issue 2. Pp. 4–15. DOI: 10.15688/re.volsu.2023.2.1. EDN BYIRUP.

20. Pérez S.E., Pabollet E.A., Marinelli E. The Role of Universities in Regional Development through Smart Specialisation Strategies: Evidence from Two Spanish Regions (Catalonia and Navarre) // Ekonomiaz. Revista vasca de Economía. 2017. Vol. 92. Issue 2. Pp. 42–67. DOI: 10.69810/ekz.1270

21. Еленева Ю.Я. Теория и методы разработки системы обеспечения конкурентоспособности промышленных предприятий : дис. ... д-ра экон. наук. М., 2002. 459 с. EDN NMBYOP.

22. Зарипова И.Р., Маргилевская Е.В. Необходимость разработки экономического механизма государственно-частного партнерства в профессиональном образовании // Креативная экономика. 2016. Т. 10. № 3. С. 279–290. DOI: 10.18334/ce.10.3.34965. EDN VSUTIX.

23. Ma J., Li X. Performance Evaluation of Education Infrastructure Public–Private Partnership Projects in the Operation Stage Based on Limited Cloud Model and Combination Weighting Method // Buildings. 2025. Vol. 15. Issue 11. P. 1833. DOI: 10.3390/buildings15111833

24. Tóth B., Motahari-Nezhad H., Horseman N., Berek L., Kovács L., Hölgyesi Á. et al. Ranking resilience: assessing the impact of scientific performance and the expansion of the Times Higher Education World University Rankings on the position of Czech, Hungarian, Polish, and Slovak universities // Scientometrics. 2024. Vol. 129. Issue 3. Pp. 1739–1770. DOI: 10.1007/s11192-023-04920-1

25. Серозудинова Г.В., Волостных П.Г., Галета М.А. Проектное обучение и деятельность студенческого научно-исследовательского сообщества // Образование. Карьера. Общество. 2018. № 1 (56). С. 45–48. EDN XRLQMX.

26. Sikombe S., Muleya F., Phiri J., Zulu S., Simasiku P.L., Situtu M. A guiding framework for promoting public-private partnerships in research and innovation: Evidence from a developing country context // African Journal of Science, Technology, Innovation and Development. 2024. Vol. 16. Issue 6. Pp. 737–750. DOI: 10.1080/20421338.2024.2381325

27. Bahadur G.C.S., Gurung S.K., Poudel R.L., Yadav U.S., Bhattacharjee A., Dhungana B.R. The Effect of Higher Education Service Quality on Satisfaction among Business Students in India and Nepal // Cogent Education. 2024. Vol. 11. Issue 1. DOI: 10.1080/2331186X.2024.2393521

28. Пономарева О.Н. Модели университетов, обеспечивающие развитие инновационной деятельности // Экономические исследования и разработки. 2020. № 7. С. 70–79. EDN OLJVTR.

29. Davey T., Martínez-Martínez S.L., Ventura R., Galan-Muros V. The Creation of Academic Spin-Offs: University-Business Collaboration Matters // The Journal of Technology Transfer. 2024. Vol. 50. Issue 4. Pp. 1567–1601. DOI: 10.1007/s10961-024-10153-y

30. Xanthopoulou A., Skordoulis M., Arsenos P., Kalantonis P. The Effect of Internal Audit on Universities' Reliability and Performance // Springer Proceedings in Business and Economics. 2024. Pp. 987–994. DOI: 10.1007/978-3-031-51038-0_106

31. Limaymanta C., Quiroz-de-García R., Rivas J., Rojas-Arroyo A., Gregorio-Chaviano O. Relationship between collaboration and normalized scientific impact in South American public universities // Scientometrics. 2022. Vol. 127. Issue 11. Pp. 6391–6411. DOI: 10.1007/s11192-022-04523-2

32. Tran L., Jung J., Unangst L., Marshall S. New developments in internationalisation of higher education // Higher Education Research & Development. 2023. Vol. 42. Issue 5. Pp. 1033–1041. DOI: 10.1080/0729-4360.2023.2216062

33. Webb S., Nguyen T.N.H. Advancing the social role of college-based higher education : a systematic literature review // Journal of Vocational Education & Training. 2024. Vol. 77. Issue 1. Pp. 9–35. DOI: 10.1080/13636820.2024.2426122

34. Алкалиф Н.Х.Н. Стратегии архитектуры и градостроительство для расширения университетских кампусов в соответствии с растущим числом студентов // Инженерный вестник Дона. 2024. № 4 (112). С. 330–342. EDN IZEVAY.

35. Чистякова А.В., Шабиев С.Г. Анализ зарубежной практики архитектурно-экологического формирования современных университетских кампусов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 1 (44). С. 168–177. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-1-168-177. EDN СКРТJM.

36. Черникова Д.В. Эволюция университетских кампусов. Современные тренды развития // Университетское управление: практика и анализ. 2024. Т. 28. № 2. С. 41–51. DOI: 10.15826/umpra.2024.02.014. EDN VMZVZV.

37. Лежнева Н.В. Анализ государственных образовательных стандартов в аспекте формирования готовности к инновационной предпринимательской деятельности у студентов вузов // Санкт-Петербургский образовательный вестник. 2018. № 7–8 (23–24). С. 29–32. EDN XYXYEH.

38. Roy R., El Marsafawy H. University Campus Life and Activities Aligned with Students' Preferences towards Designing Competency Model Framework // International Journal of Learning, Teaching and Educational Research. 2023. Vol. 22. Issue 2. Pp. 188–206. DOI: 10.26803/ijlter.22.2.11

39. Dalmarco G., Hulsink W., Blois G.V. Creating entrepreneurial universities in an emerging economy: Evidence from Brazil // Technological Forecasting and Social Change. 2018. Vol. 135. Pp. 99–111. DOI: 10.1016/j.techfore.2018.04.015

40. Саввинов В.М. Концепция устойчивого развития как основа современных практик управления образованием // Профессиональное образование в России и за рубежом. 2021. № 1 (41). С. 136–146. EDN HQOVBU.

41. Гаврильева Т.Н., Сугимото А., Фуджи М., Яманака Р., Павлов Г.Н., Кириллин Д.А. Устойчивое развитие университетов: мировые и российские практики // Высшее образование в России. 2018. Т. 27. № 7. С. 52–65. DOI: 10.31992/0869-3617-2018-27-7-52-65. EDN UUUBNE.

42. Arroyabe M.F., Schumann M., Arranz C.F.A. Mapping the entrepreneurial university literature: a text

mining approach // Studies in Higher Education. 2022. Vol. 47. Issue 5. Pp. 955–963. DOI: 10.1080/03075079.2022.2055318

43. Костина С.Н. Готова ли инфраструктура региональных вузов к решению задач цифровой трансформации? // Университетское управление: практика и анализ. 2021. Т. 25. № 3. С. 14–32. DOI: 10.15826/umpra.2021.03.024. EDN KGZCMU.

44. Дианова Ю.А., Сергеева С.В. Научно-проектный кампус университета как эффективная среда развития студента-инноватора // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Акмеология образования. Психология развития. 2023. Т. 12. № 1 (45). С. 17–23. DOI: 10.18500/2304-9790-2023-12-1-17-23. EDN MTZMZQ.

45. Франгулян К.Е. Оценка социальной инфраструктуры Тихоокеанского государственного университета как фактора его конкурентоспособности // Периферия. Журнал исследования нестоличных пространств. 2025. № 2 (7). С. 29–38. DOI: 10.38161/2949-6152-2025-2-29-38. EDN VSYCER.

46. Терновая Л.О. Социальная урбанистика: роль генения города в соединении социального места и времени // Вестник экономических и социологических исследований. 2025. № 1. С. 43–53. EDN XSWJVS.

47. Кузнецов П.С., Лешуков О.В., Елисеенко В.Ф. Особенности развития неформальных образовательных пространств университетских кампусов // Университетское управление: практика и анализ. 2023. Т. 27. № 3. С. 58–71. DOI: 10.15826/umpra.2023.03.023. EDN FKIUFS.

48. Кон В.А. Имидж вуза как составляющая системы образования и один из факторов устойчивости на примере Тихоокеанского государственного университета // Периферия. Журнал исследования нестоличных пространств. 2025. № 2 (7). С. 21–28. DOI: 10.38161/2949-6152-2025-2-21-28. EDN QECIRE.

49. Бакшеева А.Д. Взаимодействия государства, бизнеса и образовательных организаций в рамках государственно-частного партнерства // Государственно-частное партнерство. 2016. Т. 3. № 1. С. 63–78. DOI: 10.18334/ppp.3.1.35139. EDN WZIND.

50. Алеев Б.Р. Государственно-частное партнерство в образовательном кластере // Человеческий капитал и профессиональное образование. 2018. № 2 (26). С. 9–13. EDN PALJGR.

Поступила в редакцию 14 июля 2025 г.

Принята в доработанном виде 14 июля 2025 г.

Одобрена для публикации 21 июля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Наталья Григорьевна Верстина** — доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 287560, Scopus: 6506229832, ResearcherID: B-4162-201, ORCID: 0000-0002-1792-0562; verstina@mail.ru;

Ольга Олеговна Донская — аспирант кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0009-0002-2159-8665; o.donskaya@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Prigaro S.V. Approaches and methods of management of university campuses. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2022; 1(39):133-139. DOI: 10.52684/2312-3702-2022-39-1-133-139. EDN ESUECL. (rus.).
2. Shor I.M. Public-private partnership in the Russian education system: advantages, problems, and directions of development. *Bulletin of Kemerovo State University. Series: Political, Sociological and Economic Sciences*. 2022; 7(2):(24):153-161. DOI: 10.21603/2500-3372-2022-7-2-153-161. EDN MFCBFP. (rus.).
3. Mitryashkina A.A., Kovaleva T.V. Analysis of the role of the intercollegiate campus in formation of the social infrastructure of the region. *Economics and Business: Theory and Practice*. 2023; 4-2(98):66-70. DOI: 10.24412/2411-0450-2023-4-2-66-70. EDN YNRNLU. (rus.).
4. Romanova T.F., Meliksetyan S.N. Development of state-private partnership in the sphere of higher education. *Economic Sciences*. 2018; 162:146-151. EDN TYVLFI. (rus.).
5. Dolzhenko R.A. Stakeholder approach to the development of the new campus university. *The Review of Economy, the Law and Sociology*. 2024; 3:21-29. DOI: 10.24412/1998-5533-2024-3-21-29. EDN BVXCGV. (rus.).
6. Kim J., Han M. Education financing and public-private partnership development assistance model. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. 2015; 177:100-103. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.02.345
7. Ivukina Y.S., Nikolaeva N.A. Entrepreneurial universities as drivers of innovative activities in Russian regions. *Economics and Entrepreneurship*. 2023; 6(155):469-472. DOI: 10.34925/EIP.2023.155.6.078. EDN WXGSSC. (rus.).
8. Larty J., Jack S., Lockett N. Building regions: a resource-based view of a policy-led knowledge exchange network. *Regional Studies*. 2017; 51(7):994-1007. DOI: 10.1080/00343404.2016.1143093
9. Uršič D., Čater T. Digital innovation in management and business: A comprehensive review, multi-level framework, and future research agenda. *Journal of Business Research*. 2025; 197:115475. DOI: 10.1016/j.jbusres.2025.115475
10. Cai Y., Mehari Y. The Use of Institutional Theory in Higher Education Research. *Theory and Method in Higher Education Research*. 2015; 1-25. DOI: 10.1108/S2056375220150000001001
11. Tsiligiris V. An Adapted Porter Diamond Model for the Evaluation of Transnational Education Host Countries. *International Journal of Educational Management*. 2018; 32(2):210-226. DOI: 10.1108/IJEM-03-2017-0076
12. Ketels C. Recent Research on Competitiveness and Clusters: What Are the Implications for Regional Policy? *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*. 2013; 6(2):269-284. DOI: 10.1093/cjres/rst008
13. Olshanskaya M.V. Management of student campuses — innovations in the service market. *Beneficium*. 2024; 4(53):58-64. DOI: 10.34680/BENEFICIUM.2024.4(53).58-64 (rus.).
14. Nikolaev V.K., Skvortsov A.A. Principles of spatial development of an entrepreneurial university campus. *ECO*. 2023; 5(587):54-77. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2023-5-54-77. EDN MLATQG. (rus.).
15. O'Neill M., Bagchi-Sen S. Public Universities and Human Capital Development in the United States. *GeoJournal*. 2023; 88(1):733-751. DOI: 10.1007/s10708-022-10636-1
16. Criaco G., Hahn D., Minola T., Pittino D. The Role of Non-Economic Goals in Academic Spin-Offs. *The Journal of Technology Transfer*. 2025; 50(2):668-691. DOI: 10.1007/s10961-024-10111-8
17. Jeong Y.-H., Kim Y.-C., Min K.-B. Commercialisation Time and Licensing Performance of University Inventions: The Moderating Role of University Inventors. *Technology Analysis & Strategic Management*. 2025; 37(1):35-48. DOI: 10.1080/09537325.2023.2280547
18. Indrayani E. Management of Academic Information System (AIS) at Higher Education in the City of Bandung. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. 2013; 103:628-636. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.10.381
19. Kovacs A., Levai I., Nagy H. Creation Experience of Startup Campuses in Major Regions (North America, Far East, Australia and Europe). *Regional Economy. South of Russia*. 2023; 11(2):4-15. DOI: 10.15688/re.volsu.2023.2.1. EDN BYIRUP.
20. Pérez S.E., Pabollet E.A., Marinelli E. The Role of Universities in Regional Development through Smart Specialisation Strategies: Evidence from Two Spanish Regions (Catalonia and Navarre). *Ekonomiaz. Revista vasca de Economía*. 2017; 92(2):42-67. DOI: 10.69810/ekz.1270
21. Eleneva Yu.Ya. *Theory and Methods for Developing a Competitiveness Assurance System for Indus-*

trial Enterprises. Moscow, 2002; 459. EDN NMBYOP. (rus.).

22. Zaripova I.R., Margilevskaya E.V. The need for developing an economic mechanism of public-private partnership in vocational education. *Creative Economy*. 2016; 10(3):279-290. DOI: 10.18334/ce.10.3.34965. EDN VSUTIX. (rus.).

23. Ma J., Li X. Performance Evaluation of Education Infrastructure Public-Private Partnership Projects in the Operation Stage Based on Limited Cloud Model and Combination Weighting Method. *Buildings*. 2025; 15(11):1833. DOI: 10.3390/buildings15111833

24. Tóth B., Motahari-Nezhad H., Horseman N., Berek L., Kovács L., Hölgyesi Á. et al. Ranking resilience: assessing the impact of scientific performance and the expansion of the Times Higher Education World University Rankings on the position of Czech, Hungarian, Polish, and Slovak universities. *Scientometrics*. 2024; 129(3):1739-1770. DOI: 10.1007/s11192-023-04920-1

25. Serazudinova G.V., Volostnykh R.G., Galeta M.A. Project-Based Learning and Student Research Communities. *Education. Career. Society*. 2018; 1(56):45-48. EDN XRLQMX. (rus.).

26. Sikombe S., Muleya F., Phiri J., Zulu S., Simasiku P.L., Situtu M. A guiding framework for promoting public-private partnerships in research and innovation: Evidence from a developing country context. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*. 2024; 16(6):737-750. DOI: 10.1080/20421338.2024.2381325

27. Bahadur G.C.S., Gurung S.K., Poudel R.L., Yadav U.S., Bhattacharjee A., Dhungana B.R. The Effect of Higher Education Service Quality on Satisfaction among Business Students in India and Nepal. *Cogent Education*. 2024; 11(1). DOI: 10.1080/2331186X.2024.2393521

28. Ponomareva O.N. Models of universities that ensure the development of innovation activities. *Economic Research and Development*. 2020; 7:70-79. EDN OLVJTR. (rus.).

29. Davey T., Martínez-Martínez S.L., Ventura R., Galan-Muros V. The Creation of Academic Spin-Offs: University-Business Collaboration Matters. *The Journal of Technology Transfer*. 2024; 50(4):1567-1601. DOI: 10.1007/s10961-024-10153-y

30. Xanthopoulou A., Skordoulis M., Arsenos P., Kalantonis P. The Effect of Internal Audit on Universities' Reliability and Performance. *Springer Proceedings in Business and Economics*. 2024; 987-994. DOI: 10.1007/978-3-031-51038-0_106

31. Limaymanta C., Quiroz-de-García R., Rivas J., Rojas-Arroyo A., Gregorio-Chaviano O. Relationship between collaboration and normalized scientific impact in South American public universities. *Scientometrics*. 2022; 127(11):6391-6411. DOI: 10.1007/s11192-022-04523-2

32. Tran L., Jung J., Unangst L., Marshall S. New developments in internationalisation of higher education. *Higher Education Research & Development*. 2023; 42(5):1033-1041. DOI: 10.1080/07294360.2023.2216062

33. Webb S., Nguyen T.N.H. Advancing the social role of college-based higher education : a systematic literature review. *Journal of Vocational Education & Training*. 2024; 77(1):9-35. DOI: 10.1080/13636820.2024.2426122

34. Alkalif N.H.N. Architectural and urban planning strategies for expanding university campuses to accommodate growing student numbers. *Engineering Journal of Don*. 2024; 4(112):330-342. EDN IZEVAY. (rus.).

35. Chistiakova A.V., Shabiev S.G. An analysis of foreign practice in the architectural and ecological formation of contemporary university campuses. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023; 13(1):(44):168-177. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-1-168-177. EDN CKPTJM. (rus.).

36. Chernikova D.V. Evolution of university campuses. Current trends of development. *Journal University Management: Practice and Analysis*. 2024; 28(2):41-51. DOI: 10.15826/umpa.2024.02.014. EDN VMZVZV. (rus.).

37. Lezhneva N.V. Analysis of State Educational Standards for the Formation of Students' Entrepreneurial Readiness. *St. Petersburg Educational Bulletin*. 2018; 7-8(23-24):29-32. EDN XYXYEH. (rus.).

38. Roy R., El Marsafawy H. University Campus Life and Activities Aligned with Students' Preferences towards Designing Competency Model Framework. *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*. 2023; 22(2):188-206. DOI: 10.26803/ijlter.22.2.11

39. Dalmarco G., Hulsink W., Blois G.V. Creating entrepreneurial universities in an emerging economy: Evidence from Brazil. *Technological Forecasting and Social Change*. 2018; 135:99-111. DOI: 10.1016/j.techfore.2018.04.015

40. Savvinov V.M. Sustainable development concept as the basis of modern educational management practices. *Professional Education in Russia and Abroad*. 2021; 1(41):136-146. EDN HQOVBU. (rus.).

41. Gavril'yeva T.N., Sugimoto A., Fujii M., Yamanaka R., Pavlov G.N., Kirillin D.A. Sustainable development of universities: international and russian practices. *Higher Education in Russia*. 2018; 27(7):52-65. DOI: 10.31992/0869-3617-2018-27-7-52-65. EDN UUUBNE. (rus.).

42. Arroyabe M.F., Schumann M., Arranz C.F.A. Mapping the entrepreneurial university literature: a text mining approach. *Studies in Higher Education*. 2022; 47(5):955-963. DOI: 10.1080/03075079.2022.2055318

43. Kostina S.N. Is the infrastructure of regional universities ready to meet the challenges of digital

transformation? *Journal University Management: Practice and Analysis*. 2021; 25(3):14-32. DOI: 10.15826/umpa.2021.03.024. EDN KGZCMU. (rus.).

44. Dianova Yu.A., Sergeeva S.V. Research and design university campus as an effective environment for the development of a student-innovator. *Izvestiya of Saratov University. Educational Acmeology. Developmental Psychology*. 2023; 12(1):(45):17-23. DOI: 10.18500/2304-9790-2023-12-1-17-23. EDN MTZMZQ. (rus.).

45. Frangulyan K.E. Assessment of the social infrastructure of the pacific national university as a factor in its competitiveness. *Periphery. Journal of the Peripheries Studies*. 2025; 2(7):29-38. DOI: 10.38161/2949-6152-2025-2-29-38. EDN VSYCER. (rus.).

46. Ternovaya L.O. Social urbanistics: the role of the city genius in connecting social place and time. *Bulletin of Economic & Sociological Research*. 2025; 1:43-53. EDN XSWJVS. (rus.).

47. Kuznetsov P.S., Leshukov O.V., Eliseenko V.F. Development features of informal educational campus spaces. *Journal University Management: Practice and Analysis*. 2023; 27(3):58-71. DOI: 10.15826/umpa.2023.03.023. EDN FKIUFS. (rus.).

48. Kon V.A. The image of the university as a component of the education system and one of the factors of financial stability on the example of the pacific national university. *Periphery. Journal of the Peripheries Studies*. 2025; 2(7):21-28. DOI: 10.38161/2949-6152-2025-2-21-28. EDN QECIRE. (rus.).

49. Baksheeva A.D. Interaction of the state, business and educational institutions within public and private partnership. *Public-Private Partnership*. 2016; 3(1):63-78. DOI: 10.18334/ppp.3.1.35139. EDN WZIND. (rus.).

50. Aleev B.R. Public private partnership in educational cluster. *Human Capital and Professional Education*. 2018; 2(26):9-13. EDN PALJGR. (rus.).

Received July 14, 2025.

Adopted in revised form on July 14, 2025.

Approved for publication on July 21, 2025.

B I O N O T E S: **Natalia G. Verstina** — Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 287560, Scopus: 6506229832, ResearcherID: B-4162-201, ORCID: 0000-0002-1792-0562; verstina@mail.ru;

Olga O. Donskaya — postgraduate student of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0002-2159-8665; o.donskaya@gmail.com.

Authors' 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 332.8

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1609-1619

Повышение надежности и экономичности функционирования теплоснабжения городского и жилищно-коммунального хозяйства

Валерия Викторовна Глазкова, Николай Александрович Верстин,
Светлана Юрьевна Король, Татьяна Николаевна Кисель
*Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Несмотря на существенные масштабы и значимость сферы теплоснабжения для жилищно-коммунального хозяйства страны, в ее функционировании накопился ряд проблемных вопросов, которые снижают ее надежность и экономичность. Это определяет актуальность решения задачи формирования направлений повышения эффективности и надежности теплоснабжения посредством рационального использования энергетических ресурсов и разработки системы показателей оценки эффективности данных направлений. В соответствии со стратегическими документами страны энергосбережение выступает приоритетным направлением развития энергетики России, в том числе в теплоснабжении городского и жилищно-коммунального хозяйства, определяя возможности роста надежности сферы за счет динамики снижения аварий на сетях и источниках теплоснабжения и экономичности благодаря разумному использованию источников энергии.

Материалы и методы. Решение поставленной задачи осуществлялось на основе применения таких методов исследования, как логический анализ и метод систематизации. Анализ открытых информационных источников и исследований экспертов в области теплоснабжения позволил систематизировать практический опыт применения энергосберегающих мероприятий в теплоснабжении городского и жилищно-коммунального хозяйства в зависимости от этапа генерации, передачи и потребления тепловой энергии.

Результаты. Сформирован и систематизирован комплекс мероприятий, нацеленных на повышение надежности и экономичности сферы, связанный с рациональным использованием энергетических ресурсов, а также решена задача по разработке системы показателей эффективности функционирования теплоснабжения городского и жилищно-коммунального хозяйства, отражающей рост надежности и экономичности функционирования сферы в ходе реализации предложенных мероприятий.

Выводы. Применение выделенных направлений повышения энергосбережения и энергоэффективности теплоснабжения на этапах генерации, передачи и потребления тепла позволит добиться увеличения надежности и экономичности функционирования теплоснабжения городского и жилищно-коммунального хозяйства, а предложенная система показателей эффективности даст возможность отразить результаты реализации данных мероприятий с позиций роста данных характеристик сферы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теплоэнергетика, теплоснабжение, надежность и экономичность теплоснабжения, энергосбережение, энергоэффективность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Глазкова В.В., Верстин Н.А., Король С.Ю., Кисель Т.Н. Повышение надежности и экономичности функционирования теплоснабжения городского и жилищно-коммунального хозяйства // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 10. С. 1609–1619. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1609-1619

Автор, ответственный за переписку: Валерия Викторовна Глазкова, leram86@mail.ru.

Improving the reliability and cost-effectiveness of urban and municipal heat supply systems

Valeriya V. Glazkova, Nikolai A. Verstin, Svetlana Yu. Korol, Tatiana N. Kisel
*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Despite the significant scale and importance of the heat supply sector for the country's housing and public utilities, a number of persistent issues have accumulated in its operation, reducing both its reliability and economic efficiency. This underscores the need to identify directions for enhancing the performance and dependability of heat supply systems through the rational use of energy resources and to develop a comprehensive system of performance indicators. In line with Russia's strategic policy documents, energy conservation is a priority for the development of the national energy sector,

including urban heat supply, which creates opportunities to improve system reliability by reducing failures across networks and sources and to enhance cost-effectiveness through the rational use of energy resources.

Materials and methods. The research applied logical analysis and systematisation methods. An analysis of publicly available data sources and expert studies in the field of heat supply made it possible to summarise and systematise practical experience in implementing energy-saving measures across the generation, transmission, and consumption stages of thermal energy.

Results. A comprehensive set of measures aimed at improving the reliability and cost-effectiveness of heat supply through the rational use of energy resources has been developed and systematised. In addition, a framework of performance indicators has been designed to assess the effectiveness of heat-supply operations in the urban and municipal sectors, reflecting improvements in reliability and cost-effectiveness resulting from the proposed measures.

Conclusions. Implementing the proposed energy-conservation and energy-efficiency measures across the stages of heat generation, transmission, and consumption will enhance both the reliability and cost-effectiveness of urban and municipal heat-supply systems. The suggested system of performance indicators will enable a comprehensive evaluation of the effectiveness of these measures in terms of the improvements achieved.

KEYWORDS: heat power engineering, heat supply, reliability, cost-effectiveness, energy saving, energy efficiency

FOR CITATION: Glazkova V.V., Verstin N.A., Korol S.Yu., Kisel T.N. Improving the reliability and cost-effectiveness of urban and municipal heat supply systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(10):1609-1619. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1609-1619 (rus.).

Corresponding author: Valeriya V. Glazkova, leram86@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Теплоснабжение представляет собой систему, обеспечивающую генерацию, передачу и потребление тепловой энергии конечным потребителям, к которым относят население и организации. В зависимости от источника тепла — центрального или индивидуального, теплоснабжение может осуществляться централизованным или децентрализованным способом соответственно. Основным законом, регулирующим процессы функционирования и развития теплоснабжения, является Федеральный закон № 190-ФЗ «О теплоснабжении», однако, учитывая специфику сферы, теплоснабжение регулируется и законодательством смежных отраслей, включая жилищно-коммунальное хозяйство (ЖКХ), водоснабжение и электроэнергетику [1, 2].

Особенности климата и значительная протяженность территории России накладывают обязательства по бесперебойному обеспечению населения тепловой энергией, что отражает как экономический, так и социальный характер рассматриваемого вопроса. Именно бесперебойность поставки тепла потребителю определяет надежность сферы, в то время как ее экономичность следует рассматривать в контексте эффективности использования ресурсов для получения тепловой энергии как финансовых, так и энергетических.

Характеризуя функционирование отечественного теплоснабжения, отметим, что на конец 2024 г. протяженность тепловых и паровых сетей в целом по стране составляла 167 187,78 км, число источников тепла — 74 789 ед., суммарная мощность которых 572 866,68 Гкал/ч (рис. 1). Системой теплоснабжения по стране в 2024 г. было произведено 843 749,68 тыс. Гкал¹, что определяет сектор централизованного теплоснабжения России как один из крупнейших в мире.

¹ Материалы Федеральной службы государственной статистики. Раздел «Жилищные условия. Коммунальное хозяйство». URL: https://rosstat.gov.ru/statistics/zhilishhnye_usloviya

Несмотря на существенные масштабы и значимость для ЖКХ страны, в теплоснабжении накопился ряд проблемных вопросов, которые снижают надежность и экономичность сферы: количество источников тепла за последние 5 лет стабильно сокращается, в среднем на 1 % ежегодно (рис. 2), а динамика потерь тепла в сетях в ходе его транспортировки, напротив, растет (рис. 3).

Экспертами теплоснабжения называются следующие цифры, негативно характеризующие эту область: средний возраст теплоэлектроцентралей и котельных приближается к 30 годам, инженерные сети изношены на 70 % и с каждым годом эта цифра растет, так как темпы обновления новых сетей низкие, что приводит к потерям тепла на уровне 30 %. Кроме того, отмечается низкий уровень автоматизации процессов генерации, передачи и потребления тепла, что обуславливает значительный перерасход энергетических ресурсов. Таким образом, современное состояние сферы теплоснабжения не отвечает требованиям, предъявляемым к процессам его функционирования, и не в полной мере соответствует характеристикам надежности и экономичности городского и жилищно-коммунального хозяйства. Это положение определяет цель настоящего исследования, связанную с формированием направлений повышения эффективности и надежности теплоснабжения. Для достижения указанной цели в исследовании предполагается решить следующие задачи:

1) проанализировать и выявить актуальные ориентиры повышения надежности и экономичности функционирования теплоснабжения городского и жилищно-коммунального хозяйства;

2) выявить и систематизировать мероприятия, способствующие повышению надежности и экономичности функционирования теплоснабжения городского и жилищно-коммунального хозяйства;

3) сформировать систему показателей для оценки эффективности функционирования теплоснабжения городского и жилищно-коммунального хо-

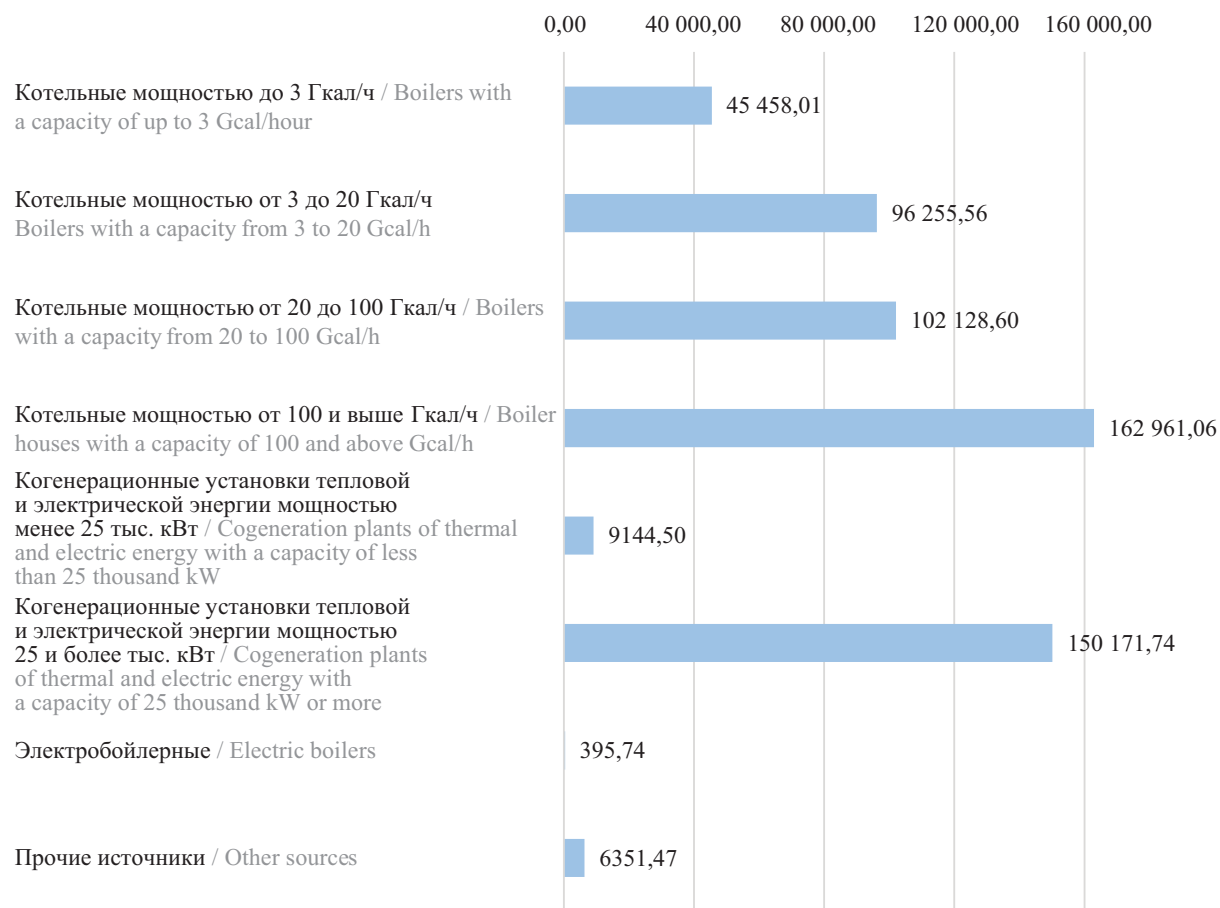


Рис. 1. Суммарная мощность источников теплоснабжения России в 2024 г. по типам источников, Гкал/ч (составлено авторами на основе материалов Росстата, раздел «Жилищные условия. Коммунальное хозяйство»¹⁾)

Fig. 1. Total capacity of heat supply sources in Russia in 2024 broken down by the source type, Gcal/h (compiled by the authors on the basis of materials of the Federal State Statistics Service, Housing Conditions. Public Utilities¹⁾)

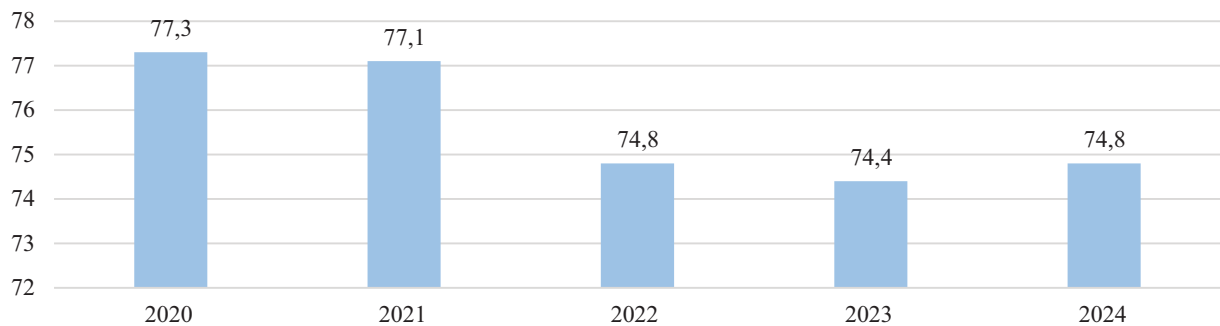


Рис. 2. Число источников теплоснабжения России всего за период 2020–2024 гг., тыс. ед. (составлено авторами на основе материалов Росстата, раздел «Жилищные условия. Коммунальное хозяйство»¹⁾)

Fig. 2. Number of heat supply sources in Russia, 2020–2024, thousand units (compiled by the authors on the basis of materials of the Federal State Statistics Service, Housing Conditions. Public Utilities¹⁾)

зайства, отражающую повышение его надежности и экономичности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения первой задачи обратимся к таким методам исследования, как логический анализ и метод систематизации. Анализ нормативной, эконо-

мической и управленческой литературы по данной теме позволяет сделать вывод, что одним из решений, способствующих повышению надежности и экономичности функционирования теплоснабжения городского и жилищно-коммунального хозяйства, может стать рациональное использование энергетических ресурсов. В соответствии с положениями Энергетической стратегии РФ на период

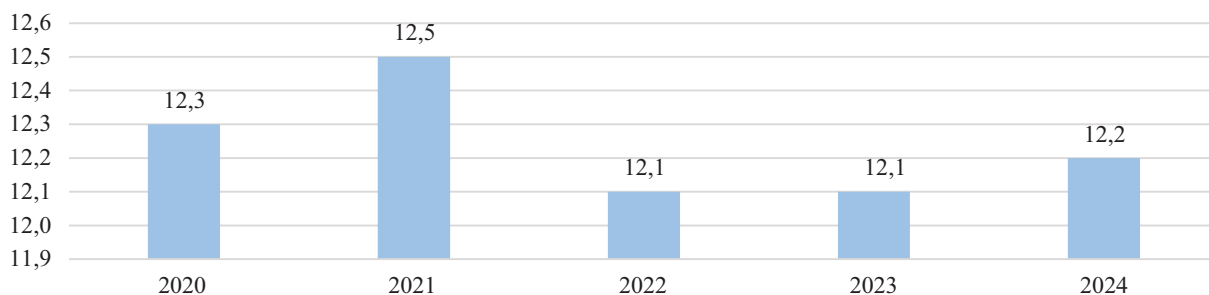


Рис. 3. Потери тепла в сетях России всего за период 2020–2024 гг., % от подачи тепла (составлено авторами на основе материалов Росстата, раздел «Жилищные условия. Коммунальное хозяйство»¹⁾)

Fig. 3. Heat losses in Russian heating networks, 2020–2024, % of heat supplied (compiled by the authors on the basis of materials of the Federal State Statistics Service, Housing Conditions. Public Utilities¹⁾)

до 2035 г.², процессы энергосбережения рассматриваются как наиболее приоритетные направления развития энергетики России, в том числе в теплоснабжении городского и жилищно-коммунального хозяйства, определяя возможности повышения надежности сферы за счет динамики снижения аварий на сетях и источниках теплоснабжения³ и экономичности благодаря разумному использованию источников энергии [3–5]. Вопросы энергосбережения в теплоснабжении с каждым годом становятся актуальнее, так как энергетические ресурсы растут в цене и спрос на энергию увеличивается [6–9]: потребление энергии в 2024 г. выросло на 2,2 % по сравнению с предыдущим годом и эти темпы роста самые значительные за период 2014–2024 гг. (рис. 4).

Согласно содержанию Энергетической стратегии РФ на период до 2035 г.² и положениям Федерального закона от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности»⁴, вопросы энергосбережения и энергоэффективности входят в число стратегических приоритетов развития страны. Для области теплоснабжения в качестве целевой задачи в рамках этих приоритетов устанавливается показатель снижения расходов энергетических ресурсов при производстве тепла котельными. Однако по результатам 2024 г. снижения расхода топлива добиться не удалось (рис. 5), и в целом мероприятия по энергосбережению в теплоснабжении, проведенные в последний год, не дали того экономического эффекта, на который рассчитывали (рис. 6). По мнению ис-

следователей В.А. Стенникова, А.В. Пеньковского, И.В. Постникова, О.А. Еделева, П.А. Соколова и других, актуальность решения вопросов энергосбережения в теплоснабжении связана с ростом тарифов на тепловую энергию, большими потерями тепла в ходе ее транспортировки, низким уровнем оснащённости приборами учета, повышающимся спросом на тепловую энергию при высоком износе основных фондов сферы и низком уровне технического обслуживания оборудования и инженерных сетей [10].

Такое положение дел свидетельствует о том, что вопросы энергосбережения в области теплоснабжения надо рассматривать комплексно, не только ориентироваться на обеспечение энергоэффективности процессов генерации тепла, как определено в стратегических документах, но и изучать направления рационального использования энергетических ресурсов в ходе функционирования сферы на этапах передачи и потребления тепловой энергии, так как эти процессы связаны между собой и каждый из них оказывает влияние на общую надежность и экономичность функционирования теплоснабжения городского и жилищно-коммунального хозяйства [10]. Многие эксперты разделяют эту точку зрения. Исследователи П.А. Вельчинская и Е.А. Бирюзова решение вопросов энергосбережения в теплоснабжении предлагают начать с определения причин потери тепловой энергии на источнике тепла, при транспортировке тепла и у потребителя. Устаревшее и изношенное оборудование и низкие темпы его модернизации выделяются авторами в качестве причины потери энергии на этапе генерации, высокая протяженность инженерных сетей, их износ, повреждения, коррозия, низкая теплоизоляция приводят к высоким потерям на стадии передачи тепловой энергии, а отсутствие приборов учета, которые позволяют соотнести необходимый объем тепла с погодными условиями, ведет к потерям в ходе потребления тепловой энергии [11]. Поэтому решение вопроса повышения надежности и экономичности функционирования теплоснабжения за счет энергосбережения невозможно без выделения основных

² Об Энергетической стратегии РФ на период до 2035 г. : Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74148810/>

³ О теплоснабжении в Российской Федерации : доклад Министерства энергетики Российской Федерации. М., 2020. 26 с.

⁴ Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (с изменениями от 01.01.2023).

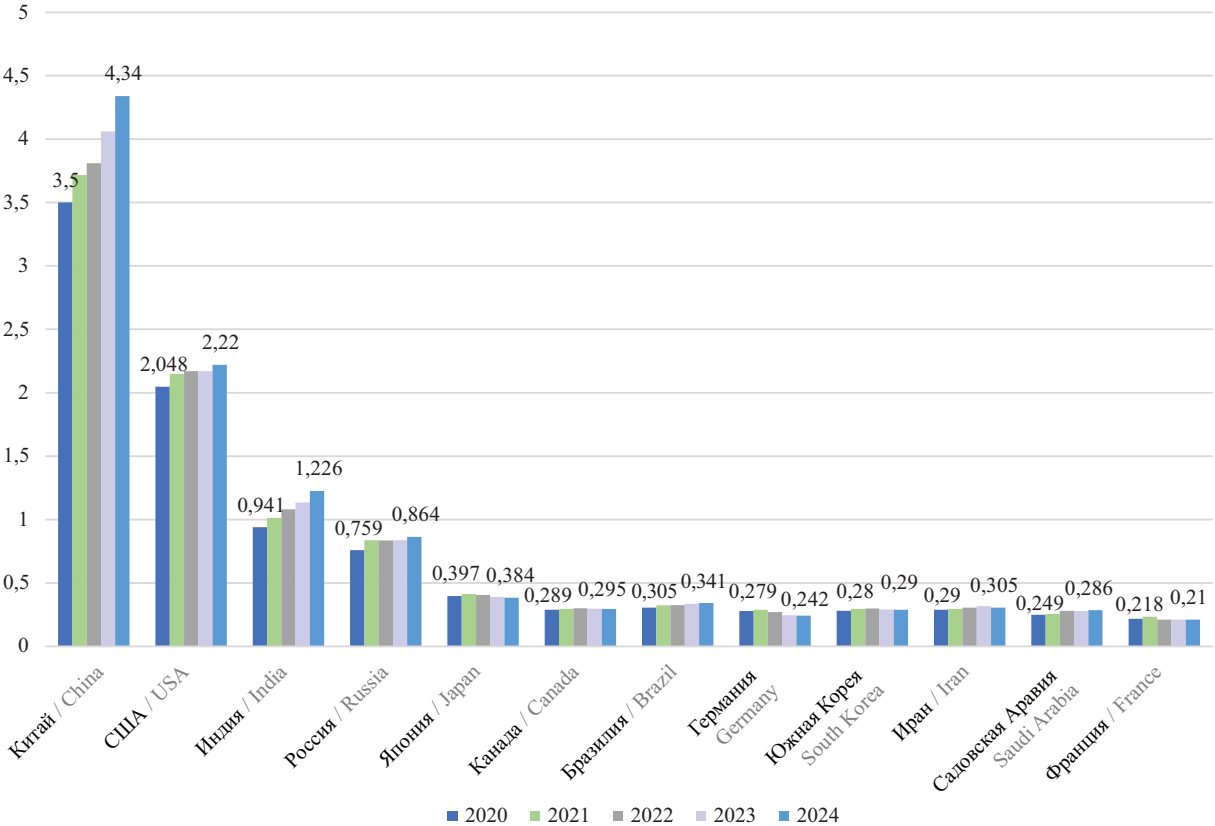


Рис. 4. Потребление энергии странами мира за период 2020–2024 гг., млрд т н. э. (составлен авторами на основе материалов сборника «Статистика мировой энергетики и климата – Ежегодник за 2024 год»⁵ и отчета Международного энергетического агентства⁶)

Fig. 4. Global energy consumption, 2020–2024, billion tonnes of oil equivalent (compiled by the authors on the basis of World Energy and Climate Statistics — Yearbook 2024⁵ and the International Energy Agency report⁶)

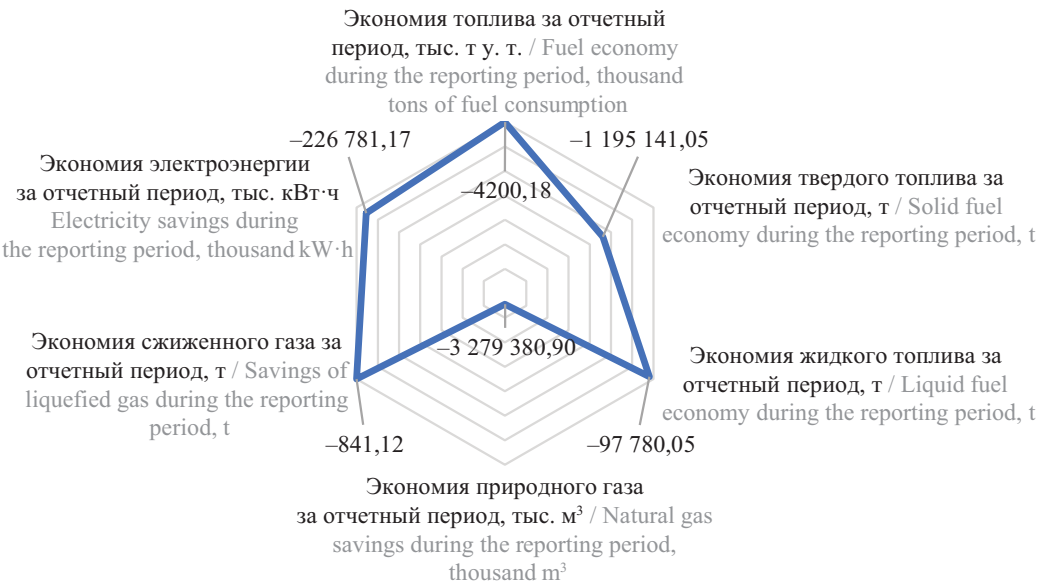


Рис. 5. Экономия топлива в 2024 г. по России (составлено авторами на основе материалов Росстата, раздел «Жилищные условия. Коммунальное хозяйство»¹)

Fig. 5. Fuel savings in Russia in 2024 (compiled by the authors on the basis of materials of the Federal State Statistics Service, Housing Conditions. Public Utilities¹)

⁵ Статистика мировой энергетики и климата – Ежегодник за 2024 год. URL: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>

⁶ Отчет Международного энергетического агентства. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>

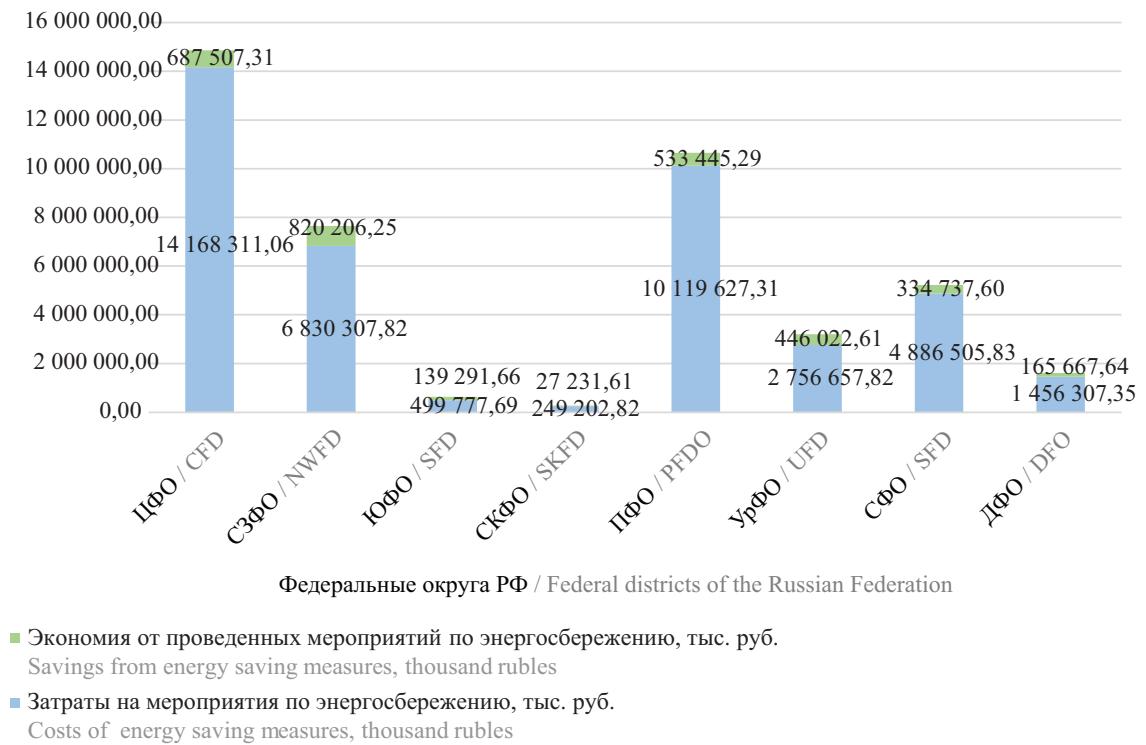


Рис. 6. Затраты на мероприятия по энергосбережению и экономия от проведенных мероприятий в 2024 г. по России и федеральным округам, тыс. руб. (составлено авторами на основе материалов Росстата, раздел «Жилищные условия. Коммунальное хозяйство»¹)

Fig. 6. Costs of energy-saving measures and resulting savings in 2024 in Russia and the federal districts, thousand rubles (compiled by the authors on the basis of materials of the Federal State Statistics Service, Housing Conditions. Public Utilities¹)

направлений и путей повышения энергоэффективности сферы и применения обоснованных показателей эффективности ее функционирования, отражающих повышение ее надежности и экономичности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения второй задачи исследования, анализируя и обобщая мнения экспертов в области теплоснабжения и практику применения энергосберегающих технологий, представим комплекс мероприятий, направленных на повышение надежности и экономичности сферы посредством рационального использования энергетических ресурсов, группируя их в зависимости от этапа генерации, передачи и потребления тепловой энергии (рис. 7).

Указанные на рис. 7 мероприятия могут реализовываться как по одиночке, так и совместно, увеличивая совокупный потенциал энергосбережения системы теплоснабжения. Вместе с тем исследователи сходятся во мнении, что автоматизация процессов теплоснабжения занимает в перечисленных мероприятиях значительную роль, обеспечивая управляемость системы, повышая ее надежность и энергоэффективность [10]. П.А. Вельчинская и Е.А. Бирюзова доказали, что автоматизация системы теплоснабжения на всех этапах позволяет достичь экономии тепловой энергии на уровне 20–30 % [11].

И.А. Башмаков в своей работе отмечает, что максимального эффекта и повышения надежности и экономичности сферы в ходе применения энергосберегающих мероприятий удастся достичь при их реализации совместно с модернизацией системы теплозащиты зданий [12]. В публикации В.А. Стенникова, А.В. Пеньковского, И.В. Постникова, О.А. Еделева и П.А. Соколова доказывается, что при отоплении многоэтажного жилого дома потери тепла через стены достигают 40 %, через окна и крышу — 18 %, через вентиляцию — 14 %, а при проведении мероприятий по теплозащите наружных стен возможно достичь до 17 % экономии тепловой энергии [10]. Исследователь А.Д. Авсюкевич выделил объемно-планировочные и строительно-конструктивные меры, реализация которых может позволить снизить нагрузку на систему теплоснабжения здания, к которым отнес важность расположения здания относительно стороны света, его форму и характер остекления, оформление фасада, характеристику устройства вентиляции и другое [13].

Выбор мероприятий, направленных на повышение надежности и экономичности функционирования теплоснабжения городского и жилищно-коммунального хозяйства, должен осуществляться с позиции сопоставления затрат на реализацию мероприятий с предполагаемыми финансовыми результатами, вы-

Генерация тепловой энергии Generation of thermal energy	Передача тепловой энергии Transfer of thermal energy	Потребление тепловой энергии Consumption of thermal energy
•оснащение приборами учета, автоматики и регулирования, диспетчеризация / installing metering, automation and control devices, dispatching; •мониторинг, контроль и аналитика параметров системы и расхода ресурсов / monitoring, control and analysis of system parameters and resources consumption; •применение инновационного оборудования и систем управления using innovative equipment and control systems; •замена изношенного оборудования replacing worn-out equipment; •строительство новых источников тепловой энергии и модернизация существующих / constructing new thermal energy sources and upgrading existing ones; •совершенствование системы водоподготовки сетевой воды improving the treatment system for delivery water; •регулярные мероприятия по обслуживанию электродвигателей, насосов / regular maintenance of electric motors and pumps; •применение антинакипных устройств на теплообменниках using antiscalants of heat exchangers	•оснащение приборами учета, автоматики и регулирования, диспетчеризация / installing metering, automation and control devices, dispatching; •мониторинг, контроль и аналитика параметров системы и расхода ресурсов monitoring, control and analysis of system parameters and resources consumption; •применение инновационного оборудования и систем управления using innovative equipment and control systems; •применение современных материалов и технологий при прокладке трубопроводов тепловых сетей / using advanced pipeline laying materials and technologies for heating networks; •нанесение антикоррозионных покрытий в конструкции теплопроводов / applying anticorrosive coatings of heat pipelines; •прокладка тепловых сетей оптимального диаметра / laying heating networks of optimal diameters; •замена изношенных инженерных сетей replacing worn-out utility networks; •строительство новых тепловых сетей и модернизация существующих constructing new heating networks and upgrading existing ones; •использование дистанционного контроля и роботизированных систем для наблюдения за состоянием сетей с целью предотвращения аварий или их локализации / using remote monitoring and robotic systems to monitor the condition of networks to prevent accidents or ensuring localization; •аэросъемка тепловых сетей для получения информации о скрытых дефектах / aerial surveying of heating networks to obtain information about hidden defects	•оснащение приборами учета, автоматики и регулирования installing metering, automation and control devices; •мониторинг, контроль и аналитика параметров системы и расхода ресурсов / monitoring, control and analysis of system parameters and resources consumption; •переход на индивидуальные схемы теплоснабжения / implementing individual heat supply plans

Рис. 7. Мероприятия, способствующие повышению надежности и экономичности функционирования теплоснабжения городского и жилищно-коммунального хозяйства посредством рационального использования ресурсов (составлено авторами)

Fig. 7. Measures to improve the reliability and cost-effectiveness of urban and municipal heat supply through the rational use of resources (compiled by the authors)

раженными в экономии энергетических ресурсов и топлива, т.е. с позиции экономической эффективности мероприятий. В этой части исследования следует отметить, что на текущий момент не сложилось единого подхода к выражению экономической эффективности функционирования теплоснабжения, показателями которого в разных работах называют и «полезный эффект», и «прибыль», и «стоимость произведенной продукции», и «наносимый или предотвращенный ущерб» и другое. В трудах В.М. Вдовина, Л.Е. Сурковой, В.А. Валентинова⁷, А.Д. Авсюкевич [13] и других эффективность функционирования теплоснабжения предлагается оценивать через характеристики готовности системы (надежности), ее технической эффективности, стоимости и ресурсосберегаемости [14–17].

⁷ Вдовин В.М., Суркова Л.Е., Валентинов В.А. Теория систем и системный анализ : учебник. 2-е изд. М. : Дашков и К°, 2012. 640 с.

Таким образом, не существует четкого и всестороннего подхода к оценке эффективности функционирования теплоснабжения, что определяет третью задачу настоящего исследования по разработке системы показателей для оценки эффективности функционирования теплоснабжения городского и жилищно-коммунального хозяйства, отражающую повышение его надежности и экономичности (таблица).

Применение выделенных направлений роста энергосбережения и энергоэффективности теплоснабжения на этапах генерации, передачи и потребления тепла позволит добиться повышения надежности и экономичности функционирования теплоснабжения городского и жилищно-коммунального хозяйства, результаты реализации которых могут быть отражены при помощи использования предложенной системы показателей эффективности функционирования сферы.

Показатели для оценки эффективности функционирования теплоснабжения городского и жилищно-коммунального хозяйства, отражающие повышение его надежности и экономичности (составлено авторами)

Indicators for assessing the performance of urban and municipal heat supply to demonstrate reliability and cost-effectiveness improvements in (compiled by the authors)

Показатель / Indicator	Единица измерения Unit of measurement	Соответствие надежности и экономичности Reliability and cost-effectiveness
Экономическая эффективность / Economic efficiency		
Увеличение выручки производителей и поставщиков тепловой энергии / Increasing proceeds of producers and suppliers of thermal power	Тыс. руб. Thousand rubles	Экономичность Cost-effectiveness
Увеличение прибыли производителей и поставщиков тепловой энергии / Increasing revenues of producers and suppliers of thermal power	Тыс. руб. Thousand rubles	Экономичность Cost-effectiveness
Снижение затрат бюджета на субсидирование организаций теплоснабжения / Reducing budgetary subsidies of heat suppliers	Тыс. руб. Thousand rubles	Экономичность Cost-effectiveness
Снижение затрат на осуществление теплоснабжения Reducing heat-supply costs	Тыс. руб. Thousand rubles	Экономичность Cost-effectiveness
Социальная эффективность / Social efficiency		
Снижение количества прекращений подачи тепловой энергии теплоносителя в результате технологических нарушений на тепловых сетях в расчете на 1 тыс. жителей / Reducing the number of heat supply interruptions due to failures in heating networks per 1,000 residents	Ед./тыс. жителей Units/thousand residents	Надежность / Reliability
Снижение количества случаев, когда в результате аварии на тепловых сетях пострадали люди и (или) их имущество на 1 тыс. жителей / Reducing the number of injuries and/or property damage cases due to accidents in heating networks per 1,000 residents	Ед./тыс. жителей Units/thousand residents	Надежность / Reliability
Снижение количества выявленных случаев несоответствия параметров теплоносителя, подаваемого потребителю, по отношению к нормативным, на 1 тыс. жителей / Reducing the number of detected cases of non-compliance of heat parameters (temperature/pressure) with standards, per 1,000 residents	Ед./тыс. жителей Units/thousand residents	Надежность / Reliability
Снижение дополнительных затрат населения, связанных с необходимостью использования альтернативных бытовых приборов обогрева / Reducing expenditure for alternative heating appliances	Тыс. руб./тыс. жителей / Thousand rubles/thousand residents	Экономичность Cost-effectiveness
Технологическая эффективность / Process efficiency		
Снижение величины технологических потерь при передаче тепловой энергии, теплоносителя по тепловым сетям на 1 км тепловых сетей / Reducing process losses during transmission of thermal energy per 1 km of heating networks	Гкал/км / Gcal/km	Экономичность Cost-effectiveness
Снижение величины эксплуатационных затрат, связанных с техническим обслуживанием участка тепловой сети в расчете на 1 км тепловых сетей / Reducing operating costs for maintaining a 1 km-long section of a heating network	Руб./км / Rub/km	Экономичность Cost-effectiveness
Снижение удельных затрат электроэнергии на передачу тепловой энергии / Reducing specific electric power consumption for the transmission of thermal energy	кВт/Гкал / kW/Gcal	Экономичность Cost-effectiveness
Снижение среднего уровня износа тепловых сетей на участке Reducing average wear of heating networks within a section	%	Надежность, экономичность Reliability, cost-effectiveness

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Не вызывает сомнения, что в современных экономических условиях энергосбережение выступает одной из доминирующих задач развития энергетики России и связанных с ней сфер. Исследователи отмечают, что сфера теплоснабжения имеет огромный потенциал энергосбережения, однако сложившаяся практика реализации разрозненных мероприятий по повышению энергоэффективности в теплоснабжении не приводит к достижению требуемого для ЖКХ страны уровня надежности и экономичности. В качестве существенных препятствий на пути практической реализации предложенных в исследовании направлений роста надежности и экономичности теплоснабжения посредством реализации энергосберегающих мероприятий становятся низкая автоматизация сферы, которая приводит к недостаточному учету объема произведенного и потребленного тепла, а также нерешенные вопросы тарифообразования на тепловую энергию.

Современный подход к тарифообразованию в области теплоснабжения делает неинтересным для инвесторов реализацию проектов, ориентированных на внедрение энергосберегающих и энергоэффективных мероприятий, так как не стимулирует организации теплоснабжения заботиться о снижении издержек и повышении надежности. Не стоит забывать, что большинство теплоснабжающих организаций являются муниципальными, что заранее делает их низко заинтересованными в снижении затрат и повышении энергоэффективности [18–20]. Таким образом, повышение надежности и экономичности функционирования теплоснабжения городского и жилищно-коммунального хозяйства за счет осуществления энергосберегающих мероприятий необходимо осуществлять в тесной взаимосвязи с органами государственной власти и местного самоуправления: без усиления роли государства и реализации законодательных инициатив в этом направлении потенциал повышения энергоэффективности сферы рискует остаться нереализованным.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Verstina N., Evseev E., Tsuverkalova O.* Strategic planning of construction and reconstruction of the facilities of the heat supply systems with the use of scenario approach // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263. P. 05028. DOI: 10.1051/e3sconf/202126305028
2. *Черненко И.Г.* О необходимости комплексной модернизации систем теплоснабжения городов // Энергобезопасность и энергосбережение. 2019. № 6. С. 13–19. DOI: 10.18635/2071-2219-2019-6-13-19. EDN DYVOZB.
3. *Verstina N., Solopova N., Taskaeva N., Meshcheryakova T., Shchepkina N.* A new approach to assessing the energy efficiency of industrial facilities // Buildings. 2022. Vol. 12. Issue 2. P. 191. DOI: 10.3390/buildings-12020191
4. *Zhu L., Zheng W., Zhong Z., Gong Zh., Guo J.* Development prospect of heat supply and peak shaving of nuclear power units in Shandong power grid // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 375. P. 02002. DOI: 10.1051/e3sconf/202337502002
5. *Глазкова В.В., Верстин Н.А.* Концептуальный подход к управлению инновационным развитием сферы теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 2. С. 317–328. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.317-328
6. *Рахимова Ю.И., Краснова Н.П., Горшенин А.С.* Основные мероприятия по энергосбережению в системах теплоснабжения // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2024. № 3 (267). С. 48–50. EDN FSXKMQ.
7. *Sun Yu., Li X., Wei W., Xue H., Wang W., Deng Sh.* Development of a variable water temperature control method for air source heat pump based on the supply–demand balance // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Vol. 52. P. 102366. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102366. EDN UFLWXC.
8. *Evseev E., Kisel T.* Integrated efficiency evaluation of the heat-supplying enterprises activity // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 164. P. 01024. DOI: 10.1051/e3sconf/202016401024
9. *Glazkova V.V.* Principles of Ecological and Economic Management of Innovative Development of Heat Supply // Springer Proceedings in Business and Economics. 2023. Pp. 211–221. DOI: 10.1007/978-3-031-30498-9_19
10. *Стенников В.А., Пеньковский А.В., Постников И.В., Еделева О.А., Соколов П.А.* Методические принципы и подходы к выбору энергосберегающих мер в теплоэнергетике // Энергобезопасность и энергосбережение. 2020. № 3. С. 10–15. DOI: 10.18635/2071-2219-2020-3-10-15. EDN DWRUFB.
11. *Вельчинская П.А., Бирюзова Е.А.* Энергосбережение в теплоснабжении // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика. Даниловские чтения – 2020 : сб. науч. тр. 2020. С. 58–61. EDN WKEDCO.
12. *Башмаков И.А.* Повышение энергоэффективности в системах теплоснабжения // Энергосбережение. 2010. № 3. С. 62–67. EDN UZDBKZ.
13. *Авсюкевич А.Д.* Энергоэффективность и энергосбережение в системах теплоснабжения // Строитель-

ство уникальных зданий и сооружений. 2013. № 2 (7). С. 40–54. EDN PXRTCX.

14. Nikitin Ye. Ye., Komkov I.S. An integrated approach to the development of plans for transformation of electrical and heat supply systems // *Energy Technologies and Resource Saving*. 2022. Issue 2. Pp. 4–16. DOI: 10.33070/etars.2.2022.01. EDN AGOBRZ.

15. Wang Z., Zhao M. The evolution of urban physical education development model and its innovative development strategy // *Educational Administration: Theory and Practice*. 2023. Vol. 29. Issue 4. Pp. 144–158. DOI: 10.52152/kuey.v29i4.854

16. Kostyuchenko T.N., Gracheva D.O., Telnova N.N., Tenishchev A.V., Cheremnykh M.B. Assessment of efficiency and production risks in crop production innovative development // *Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes*. 2022. Pp. 411–418. DOI: 10.1007/978-981-16-8731-0_40

17. Babych S., Kryvda V., Zhanko K., Zubak V., Suvorov V. Development of models and methods for au-

tomated control of heat supply system with optimization of technical means structure // *Energy Engineering and Control Systems*. 2023. Vol. 9. Issue 2. Pp. 119–130. DOI: 10.23939/jeecs2023.02.119

18. Gagulina N., Zaedinov A. Energy-saving potential of heating networks in Russia // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 258. P. 11001. DOI: 10.1051/e3sconf/202125811001

19. Sun X., Chen F., Pan Z., Bai L. Research and Evaluation of Energy-Saving Reconstruction of Intelligent Community Heating System Based on the Internet of Things // *International Journal of Heat and Technology*. 2021. Vol. 39. Issue 3. Pp. 701–710. DOI: 10.18280/ijht.390304

20. Dongellini M., Naldi C., Morini G.L. Influence of sizing strategy and control rules on the energy saving potential of heat pump hybrid systems in a residential building // *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 235. P. 114022. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114022

Поступила в редакцию 15 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 августа 2025 г.

Одобрена для публикации 9 сентября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **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;

Николай Александрович Верстин — преподаватель кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1213722, ORCID: 0000-0001-9798-7777; verstinnick@gmail.com;

Светлана Юрьевна Король — старший преподаватель кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1158712, Scopus: 57204363873, ORCID: 0000-0002-9750-1631; korolsvetlana17@mail.ru;

Татьяна Николаевна Кисель — доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры «Менеджмент и инновации»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 655408, Scopus: 56184206400, ResearcherID: R-1538-201, ORCID: 0000-0002-6898-4822; doremi2@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

REFERENCES

1. Verstina N., Evseev E., Tsuverkalova O. Strategic planning of construction and reconstruction of the facilities of the heat supply systems with the use of scenario approach. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:05028. DOI: 10.1051/e3sconf/202126305028

2. Chernenko I. On urban district heating comprehensive modernization. *Energy Safety and Energy Economy*. 2019; 6:13-19. DOI: 10.18635/2071-2219-2019-6-13-19. EDN DYVOZB. (rus.).

3. Verstina N., Solopova N., Taskaeva N., Meshcheryakova T., Shchepkina N. A new approach to assessing the energy efficiency of industrial facilities. *Buildings*. 2022; 12(2):191. DOI: 10.3390/buildings12020191

4. Zhu L., Zheng W., Zhong Z., Gong Zh., Guo J. Development prospect of heat supply and peak shaving of nuclear power units in Shandong power grid. *E3S Web of Conferences*. 2023; 375:02002. DOI: 10.1051/e3sconf/202337502002

5. Glazkova V.V., Verstin N.A. A conceptual approach to the management of the innovative development of the heat supply sector. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(2):317-328. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.317-328 (rus.).
6. Rakhimova Yu.I., Krasnova N.P., Gorshenin A.S. Basic energy saving measures in heat supply systems. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2024; 3(267):48-50. EDN FSXKMQ. (rus.).
7. Sun Yu., Li X., Wei W., Xue H., Wang W., Deng Sh. Development of a variable water temperature control method for air source heat pump based on the supply-demand balance. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022; 52:102366. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102366. EDN UFLWXC.
8. Evseev E., Kisel T. Integrated efficiency evaluation of the heat-supplying enterprises activity. *E3S Web of Conferences*. 2020; 164:01024. DOI: 10.1051/e3sconf/202016401024
9. Glazkova V.V. Principles of Ecological and Economic Management of Innovative Development of Heat Supply. *Springer Proceedings in Business and Economics*. 2023; 211-221. DOI: 10.1007/978-3-031-30498-9_19
10. Stennikov V., Penkovsky A., Postnikov I., Edeleva O., Sokolov P. Methodological principles and approaches to selecting energy saving measures in the heat power sector. *Energy Safety and Energy Economy*. 2020; 3:10-15. DOI: 10.18635/2071-2219-2020-3-10-15. EDN DWRUFB. (rus.).
11. Velchinskaya P.A., Biryuzova E.A. Energy saving in heat supply. Energy and resource saving. Energy supply. Alternative and renewable energy sources. Nuclear energy. *Danilov Readings – 2020 : collection of scientific*. 2020; 58-61. EDN WKEDCO. (rus.).
12. Bashmakov I.A. Improving energy efficiency in heat supply systems. *Energoberezhenie*. 2010; 3:62-67. EDN UZDBKZ. (rus.).
13. Avsiukevich A.D. Energy efficiency and energy saving in heat supply systems. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2013; 2(7):40-54. EDN PXRTCX. (rus.).
14. Nikitin Ye.Ye., Komkov I.S. An integrated approach to the development of plans for transformation of electrical and heat supply systems. *Energy Technologies and Resource Saving*. 2022; 2:4-16. DOI: 10.33070/etars.2.2022.01. EDN AGOBRZ.
15. Wang Z., Zhao M. The evolution of urban physical education development model and its innovative development strategy. *Educational Administration: Theory and Practice*. 2023; 29(4):144-158. DOI: 10.52152/kuey.v29i4.854
16. Kostyuchenko T.N., Gracheva D.O., Telnova N.N., Tenishchev A.V., Cheremnykh M.B. Assessment of efficiency and production risks in crop production innovative development. *Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes*. 2022; 411-418. DOI: 10.1007/978-981-16-8731-0_40
17. Babysh S., Kryvda V., Zhanko K., Zubak V., Suvorov V. Development of models and methods for automated control of heat supply system with optimization of technical means structure. *Energy Engineering and Control Systems*. 2023; 9(2):119-130. DOI: 10.23939/jeecs2023.02.119
18. Gagulina N., Zaedinov A. Energy-saving potential of heating networks in Russia. *E3S Web of Conferences*. 2021; 258:11001. DOI: 10.1051/e3sconf/202125811001
19. Sun X., Chen F., Pan Z., Bai L. Research and Evaluation of Energy-Saving Reconstruction of Intelligent Community Heating System Based on the Internet of Things. *International Journal of Heat and Technology*. 2021; 39(3):701-710. DOI: 10.18280/ijht.390304
20. Dongellini M., Naldi C., Morini G.L. Influence of sizing strategy and control rules on the energy saving potential of heat pump hybrid systems in a residential building. *Energy Conversion and Management*. 2021; 235:114022. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114022

Received August 15, 2025.

Adopted in revised form on August 15, 2025.

Approved for publication on September 9, 2025.

B I O N O T E S: **Valeriya V. Glazkova** — Doctor of Economics, 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;

Nikolai A. Verstin — lecturer of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1213722, ORCID: 0000-0001-9798-7777; verstinnick@gmail.com;

Svetlana Yu. Korol — senior lecturer of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1158712, Scopus: 57204363873; korolsvetlana17@mail.ru;

Tatiana N. Kisel — Doctor of Economics, 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: 655408, Scopus: 56184206400, ResearcherID: R-1538-201, ORCID: 0000-0002-6898-4822; doremi2@yandex.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.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список источников указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество 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 инициал*

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «**Вклад авторов:**» (**Contribution of the authors:**). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже

известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf 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 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²...

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 аннотаций.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы*

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указы-

вают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями **ГОСТа Р 7.0.5–2008**.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в

Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bionotes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В. В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

И з в е щ е н и е

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391032146430000000017300

(ИНН получателя платежа)(номер счета получателя платежа)

вГУ Банка России по ЦФОБИК004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК000000000000000000000000130

ОКТМО45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа

3 822

руб.

00

коп.

услуги

руб.

коп.

Итого

руб.

коп.

«

»

20

г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391032146430000000017300

(ИНН получателя платежа)(номер счета получателя платежа)

вГУ Банка России по ЦФОБИК004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК000000000000000000000000130

ОКТМО45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа

3 822

руб.

00

коп.

услуги

руб.

коп.

Итого

руб.

коп.

«

»

20

г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

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/>



