

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 20. Выпуск 4
2025**

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

Сквозной номер 197

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 20. Issue 4
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	29.04.2025.
Подписан в свет	30.04.2025.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 17,67. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 132

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, проректор, главный научный сотрудник научно-образовательного центра «Геотехника», НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

строительный факультет, Республика Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: Алла Русланбековна Табекова

Редактор: Татьяна Владимировна Бердникова

Перевод на английский язык: Ольга Валерьевна Юденкова

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Дизайн и верстка: Алина Юрьевна Байкова

Владимир Викторович Дёмкин

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

тектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	29.04.2025

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*

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova*

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

Corrector: *Oksana V. Ermikhina*

Layout: *Alina Y. Baykova*

Vladimir V. Dyomkin

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

В.Н. Ткачев

Эволюция оборонного зодчества: от символики угрозы к печати апокалипсиса 485

А.Б. Бодэ, Т.В. Жигальцова

Деревянные церкви нижней Онеги XVII–XIX веков. Типологический аспект 496

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

А.Н. Малахова

Учет дефектов и повреждений железобетонных конструкций при выполнении поверочных расчетов 506

А.А. Василькин, И.А. Василькин

Влияние режима пескоструйной обработки на шероховатость поверхности фрикционных соединений . . . 516

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

М.А. Вассуф, Д.Ю. Омран, А. Хейрбек

Использование натурального пуццолана в качестве улучшения портландцемента для производства бетона с экологическими свойствами («зеленый» бетон) 529

Х.А. Кайс, Н.Н. Морозова

Гидрофизические и механические свойства мелкозернистого бетона на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего 545

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

А.И. Ревин, И.В. Бузякова

Экспериментальные исследования волновых процессов в трубопроводной системе 559

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.С. Широкова, М.В. Петроченко, Е.М. Мелехин

Методика аудита информационной модели здания для оценки реализации сценариев использования 569

С.В. Федосов, Б.Е. Нармания, Е.Л. Смирнова, В.С. Коновалова, Н.С. Касьяненко

Понятие «жизненный цикл здания»: к вопросу о концептуализации 584

Н.Г. Верстина, Н.Н. Щепкина, В.С. Цура

Тенденции обновления городских пространств мегаполисов России в современных условиях 596

Требования к оформлению научной статьи 615

482

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Valentin N. Tkachev

Architecture of the ban 485

Andrey B. Bode, Tatiana V. Zhigaltsova

Wooden churches of the lower Onega of the XVII–XIX centuries. Typological aspect 496

CONSTRUCTION SYSTEM DESIGN AND LAYOUT PLANNING.

CONSTRUCTION MECHANICS. BASES AND FOUNDATIONS,

UNDERGROUND STRUCTURES

Anna N. Malahova

Consideration of defects and damages of reinforced concrete structures in verification calculations 506

Andrey A. Vasil'kin, Ilya A. Vasilkin

The influence of sandblasting mode on the surface roughness of friction joints 516

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Moustafa Ali Wassouf, Jamal Younes Omran, Ali Kheirbek

Using natural pozzolana as an improvement of Portland cement to manufacture concrete with environmental properties (Green Concrete) 529

Hamza A. Qais, Nina N. Morozova

Hydrophysical and mechanical properties of fine-grained concrete based on gypsum cement pozzolanic binder 545

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Andrey I. Revin, Inna V. Buzyakova

Experimental studies of wave processes in the pipeline system 559

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION.

ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Veronika S. Shirokova, Marina V. Petrochenko, Egor M. Melekhin

Methodology for auditing the building information model to assess the realization of use scenarios 569

Sergey V. Fedosov, Boris E. Narmaniya, Elena L. Smirnova, Viktoriya S. Konovalova, Nataliya S. Kasiyanenko

The concept of “building life cycle”: the issue of conceptualization 584

Natalia G. Verstina, Natalia N. Shchepkina, Vladimir S. Tsura

Trends of urban renewal in Russian megacities in modern conditions 596

Requirements for research paper design 615

483

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 72.01:316.6

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.485-495

Эволюция оборонного зодчества: от символики угрозы к печати апокалипсиса

Валентин Никитович Ткачев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются психологические аспекты генерации визионов — визуальных знаков угрозы, запрета, предупреждения, выраженных архитектурными формами, и динамика преобразований натуральных знаков психического воздействия на условные, изобразительные, играющие существенную роль в динамике социальных преобразований современного общества.

Материалы и методы. Основной методологический прием исследования — вычленение из позитивных понятий коммуникативных режимов визионов страха, запрета, угрозы по принципу «от противного». Материалы для интерпретации представлены в профессиональной прессе обширным диапазоном приемов общения, в том числе в сфере проксемики. Альтернативное суждение дает основания для выводов, поясняющих потенциал негативных воздействий на психику человека средствами архитектурной образности.

Результаты. Приведен широкий спектр эволюционных преобразований в сфере коммуникаций от знаков предупреждения до сигналов опасности и запретных действий, для усиления психологического воздействия которых используются архитектурные формы и образная символика, характеризующие в целом социокультурное состояние общества и его перспективы.

Выводы. Архитектурная символика угрозы и предупреждения в процессе развития цивилизации неизбежно приводит к демонстрации антигуманных тенденций в обществе, которые становятся индикаторами грядущих международных конфликтов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: знаки психического воздействия на сознание, категории угрозы и защиты, проксемика, визионы, выразительность, образ среды, «говорящая» архитектура, декаданс

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ткачев В.Н. Эволюция оборонного зодчества: от символики угрозы к печати апокалипсиса // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 4. С. 485–495. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.485-495

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

Architecture of the ban

Valentin N. Tkachev

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

ABSTRACT

Introduction. The psychological aspects of generation of visions — visual signs of threat, prohibition, and warning, expressed by architectural forms, and dynamics of transformations of natural signs of mental influence on conventional, pictorial ones, which play an essential role in the dynamics of social transformations of modern society, are considered.

Materials and methods. The main methodological technique of the study is to isolate from positive concepts the communicative modes of fear, prohibition, and threat according to the principle “by contradiction”. The materials for interpretation are presented in the professional press by a wide range of communication techniques, including in the field of proxemics. The alternative judgment gives grounds for conclusions explaining the potential of negative effects on the human psyche by means of architectural imagery.

Results. They are represented by a wide range of evolutionary transformations in the field of communications, from warning signs to danger signals and prohibited actions, to enhance the psychological impact of which architectural forms and figurative symbols are used, characterizing the overall socio-cultural state of society and its prospects.

Conclusions. The architectural symbolism of threat and warning in the process of civilization development inevitably leads to the demonstration of inhumane tendencies in society, which become indicators of upcoming international conflicts.

KEYWORDS: signs of mental influence on consciousness, categories of threat and protection, proxemics, visions, expressiveness, image of the environment, “talking” architecture, decadence

FOR CITATION: Tkachev V.N. Architecture of the ban. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(4):485-495. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.485-495 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

В организацию среды обитания входит создание физиологического и психологического комфорта. С древнейших времен актуальна задача защиты места обитания и отпугивание незваных визитеров.

Восприятием окружающего мира в сознании образуется картина его позитивных и негативных качеств. Кванты впечатлений — визионы — откладываются в памяти наблюдателя и составляют ресурс стимулов ментальной и физической деятельности.

Визионами позитивной информации накапливается опыт благополучной жизни, визионы угрозы отторжения, страха — а их список гораздо шире — ставят нередко вопросы жизни — смерти, им в исследовании уделяется основное внимание.

Психологический баланс потенциалов позитивной и негативной информации, исходящей в том числе от наблюдения архитектуры, определяет подсознательно адекватность поведения человека и транслируется в общественное мировоззрение. Особенно заметное влияние на духовный мир общества оказывают депрессивные мотивации морали в эпохи потери надежности миропорядка.

Набор архетипов реакции на внешнюю направленную информацию со временем обогащается искусными приемами создания программируемого внушения знаков угрозы, защищенности, неприступности или гостеприимства; создание этих визионов есть продукт пограничных контактов общения с визитерами.

Сила воздействия искусственных знаков и символов, определяющих тонус общения, зависит от опыта режиссера негласного сценария контактов, в том числе и от проксемики дистанционного поведения [1–5].

Созревание цивилизованности общества замещает обоюдоострую ортодоксальность прямых знаков угрозы и надежной защиты на общепонятные предупредительные символы: мегалитическая кладка крепостных стен имитируется декоративной нарезкой квадратов, защита от злых духов ограничивается начертанием мелового круга.

Тем не менее конвенциональные средства предупреждения прямого конфликта все же подкрепляются видимыми знаками, например колючей проволокой, подавляющим видом монументальной архитектуры, холодной надменностью симметрии, экстравагантными формами сооружений...

В архитектурных формах концентрируются вневременные знаки и символы «говорящей» архитектуры в диапазоне плюс-минус реакции наблюдателя в зависимости от его подготовленности и убедительности сигнала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В методологическом смысле любой материал по существующей и проектируемой архитектуре мо-

жет служить источником информации об ортодоксальных приемах защиты и нападения.

Исторически впечатления угрозы (и одновременно защищенности) отпечатывались в общественном сознании как понятия, связанные с военными действиями. Имеется обширная литература, освещающая фортификацию замков и крепостей [6–14]; это лишь малая часть публикаций, из которых наиболее всеобъемлющей является работа В.В. Яковлева, включающая информацию о деятельности С. Вобана, Д. Карбышева, Ц. Кюи [15].

В военных текстах не принято излагать психологические мотивы при разработке фортификационных решений.

Эмоциональные аспекты восприятия образа доживших до наших дней замков и средневековых крепостей, тем более их руин, естественно, украшены пафосом или печалью памяти. Чувства, которые внушает вид таких объектов, рождаются, главным образом, воображением наблюдателей, подогреваемым легендами и парейдолией [16–18].

В любом случае памятники культуры и архитектуры осознаются как следы свершившихся событий, сценарии которых дают толчок к их оценке как артефактов, сработанных историей.

Социальные бури, бушевавшие столетия назад, реально и предметно отражены в укреплениях крепостей, в изолированности живописных композиций замков, и сегодня в меру воображения мы можем взглянуть в, увы, неромантические события того времени.

И потому методология нашего исследования привлекает эмоциональные «вытяжки» из рутинных описаний и наблюдения некогда грозных объектов монументального зодчества, не обязательно крепостного. Их сегодняшний облик и склоняет к романтическим описаниям (рис. 1).

Но «угрожающая» архитектура существует и в наше время, просто визионы прямых запре-



Рис. 1. Образец фортификации средневековой крепости¹

Fig. 1. A specimen of the fortification of a medieval fortress¹

¹ URL: <https://i.pinimg.com/736x/1a/f1/69/1af169ed00784cb5e5e390bb6e58c622d--south-yorkshire-yorkshire-england.jpg>

тов сменились на условную информацию, предупреждающую агрессора о бесперспективности нападения. А услужливое воображение предлагает видения «страшилок» не обязательно военного содержания, которые рассмотрены ниже.

Таким образом, в истории заложен основной источник информации, интерпретация которой и составляет предмет авторского исследования [19–24]. Но цель его лежит глубже. Творцы современной архитектуры, возможно, не подозревая того, демонстрируют архитектуру, внешний образ которой несет угрозу в надфизическом смысле, апеллируя к глубинным ассоциациям, нагнетаемым современными СМИ и стилистическими модуляциями в архитектурной эстетике нарочитой руинированности, разрушения, незавершенности, с тектоническими искажениями (рис. 2). Авторы современных экстравагантных шедевров, наверное, должны хотя бы подсознательно понимать депрессирующее влияние своих работ на общественное мировоззрение. Данная статья — предупреждение.

Архитектура в своей образной символике не вызывает ортодоксальных впечатлений, они скорее воспринимаются подсознательно, и ощущения «приятя» объекта возникают благодаря сенситивному потенциалу личности наблюдателя, который затем транслируется в общественное сознание. Иногда наоборот — существующее мнение накладывается на тонус индивидуального впечатления.

Чувство, близкое страху, при виде руин старинного замка в лесистом ущелье, над которым тяготеет миф о проклятии, возникает у наблюдателя подготовленного, впечатлительного и верящего в потусторонние силы. Обмен мнениями только подогревает атмосферу угрозы, закрепляет реноме объекта в культурном поле, создавая ему фантастический ореол, одновременно привлекающий и пугающий.



Рис. 2. Архитектура военизированного брутализма в Берлине²

Fig. 2. Architecture of militarized brutalism in Berlin²

² URL: <https://i.pinimg.com/originals/a5/b9/4a/a5b94ad1df5c48ce93dc0341f8c38647.png>

Порции ощущений — визионов, формируют в сознании окрашенные психикой образы отдельных сюжетов, пригодных для составления каталога впечатлений: предметно ассоциативных, смешных, пугающих, угрожающих, внушающих гнев.

Визионы — тот освоенный человеком визуальный материал, на котором строятся порой весьма значительные события. Леонардо да Винчи рекомендовал развивать воображение, наблюдая бесформенные чернильные пятна, итальянский астроном Дж.В. Скиапарелли увидел «каналы» на Марсе, а византийский император Константин Великий поклялся принять христианство, увидев знамение в виде креста на небе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для соблюдения логики повествования целесообразно воспользоваться принципами исторической последовательности. Они же обозначают развитие предпосылок повышения активности формирования в сознании понимания знаков угрозы и предостережения, а позже их генерирования в жизни и искусстве. Архитектура в этом процессе играет роль накопителя и предьявителя образов, создающих пакет заданных впечатлений.

Психологические эффекты, результирующие действия, побуждающие сознание к преобразованию внешних ощущений во впечатления, вооруженные памятью и фантазией, при попытке классификации визионов не дали четко очерченных характеристик. Например, возбужденные импульсы страха могут иметь различные силу и направление воздействия на психику — от приятного щекотания нервов на карусели «Русские горки» до смертельного ужаса падения в пропасть, или приступа гнева.

Мгновенная реакция сознания (или подсознания!) на неожиданные, как правило психические, атаки не разделяет на составляющие факторы акты воздействия, синтезирующие визионы, и других сенсорных систем, в том числе вестибулярных, звуковых, обонятельных, которые могут в резонансе породить шестое чувство — экстрасенсорное восприятие ситуации. Интуитивное понимание сложности перекрестных взаимодействий факторов возбуждения сенсорики и негативной реакции на них представляет, как выясняется, немаловажное значение для организации комфортной архитектурной среды, посильной опытному дизайнеру.

Поэтому, оставляя желающим попытки классификации этого объемного явления как естественного или искусственного генерирования угрозы, запрета, возбуждения страха компетентным психологам, авторы будут оперировать только с очевидными визионами в их ортодоксальном влиянии на сознание, тем более что спонтанное возбуждение синкретично по природе и не поддается расчленению.

Визуальная оценка среды всегда была первым и наиболее важным итогом решения поселиться

на приглянувшемся месте, где по заключению «аксакалов» отсутствовали угрожающие жизни признаки. То есть выбиралась территория, защищенная от непогоды, от нападений зверей и непрошенных гостей. Позднее выбор места обитания основывался на более тонких мотивах, исходящих из учета изощренных видов нападения и противопоставленных им средств защиты: расположением на острове, полуострове, в глухих лесах, за топкими болотами, на горе или в неприступном ущелье.

Для древнего человека, наткнувшегося на забор из остро заточенных кольев, на который навешаны черепа хищных животных, а то и врагов, будет понятно, что делать.

Каменные и бревенчатые ограды недвусмысленно намекают на надежную защиту.

Обладавшие широкомасштабным восприятием пространства кочевники для защиты своих территорий могли силами пленных возвести стены в виде каменных гряд на многие километры. Кочевой быт, простой в своих жизненных проявлениях, породил столь же простые (но и непреодолимые) условности различных запретов, касающихся даже произвольных покушений на суверенитет хозяина кочевья — нельзя наступать на порог юрты, трогать растяжки палатки, отказываться пройти через аллею очистительного огня и нарушать неписаные житейские ритуалы, свидетельствующие, что ты — «свой».

В деспотических государствах Египта и Междуречья сложились свои системы ритуальных игр допущения к священной персоне с жесткими ограничениями.

Мы сегодня склонны больше ценить эмоциональные мотивы выбора защищенного места для поселений, крепостей, замков древности и средневековья, видя в их образности еще и реализованные эстетические ожидания. Хотя по большей части их архитектура диктовалась тривиальной прагматикой, и мы видим красоту этих стихийно сложившихся по соображениям защиты сооружений в естественности монументальных стен и бастионов, наблюдательных и оборонительных башен, рвов и подъемных мостов.

Конечно, креативный тезис надежности защиты и демонстрации угрозы присутствовал в сознании строителей, заинтересованных в «товарном» виде создаваемой архитектуры, ее функциональной убедительности.

Сведения о целенаправленном возведении замка Нойшванштайн исключительно по романтическим мотивам документально отражены только в деятельности странного баварского короля Людвиг II. Это образец эстетской интерпретации фортификационной сущности замка (рис. 3).

Но многие средневековые замки, скорее их руины, представляют визионы, вызывающие смешанное впечатление красоты и неясной тревоги, если к тому же с ними связаны легенды о страшных событиях феодальных войн, вроде замка валашского

господаря Влада III — графа Дракулы. ореол парализующего средневекового ужаса тяготеет над всеми замками Трансильвании (рис. 4).

Развитое опознание феноменов, вызывающих представления страха, ужаса, запрета, оцепенения, а с другой стороны — укрепления, консолидации, упрочения, неприступности, имеет историческое происхождение и закреплено в коллективном созна-



Рис. 3. Замок Нойшванштайн — причуда баварского короля Людвиг II³

Fig. 3. Neuschwanstein Castle, a quirk of the Bavarian King Ludwig II³



Рис. 4. Одно из устрашающих видений замков Трансильвании⁴

Fig. 4. One of the terrifying visions of Transylvania castles⁴

³ URL: <https://i.pinimg.com/736x/cf/63/66/cf6366d37864d61890f8e69a9342d39b.jpg>

⁴ URL: <https://i.pinimg.com/originals/ee/9a/7e/ee9a7e54921102d8629e7410705e1004.jpg>

нии общества благодаря вербализации архетипов, обрванной фиксации воображаемых страшилок, истоки которых заимствованы генетикой становления опыта защитной мотивации сознания.

Все они суть производные фантазии зрителей, индуктированной впечатляющими явлениями действительности, образно акцентированными и подсказывающими ассоциации: в кариатидах или атлантах, заменяющих колонны, изображениях горгулий, сатанинских персонажей с уже откровенными угрозами в адрес впечатлительных прихожан.

Вал накопления и демонстрации систем наказания и угроз вероотступникам прокатился по изобразительному искусству, успешно освоенному средневековой церковью.

Внутренние композиции страшного суда над грешниками на тимпанах входных порталов готических соборов, если согласиться с гипотезой Виолле-ле-Дюка о восточных истоках европейской готики, ведут начало из многофигурных скульптурных композиций индийских храмов, от которых наследовали также ернически-эротическое содержание горельефов (рис. 5).

Как будто издеваясь над грозными ортодоксальными догмами католической церкви, масоны позволяли себе ваять на фасадах храмов иронические персонажи.

Проще поддаются квалификации градации устрашающих образов: предупреждающих, предостерегающих, запрещающих, вызывающих напряжение и отвращение, грозящих гибелью — предполагающих реакции в виде усвоения опасности и прямой угрозы, страха или гнева, а нередко и юмора.

Можно также постулировать последовательность психологического цикла угроз: внушение —

ощущение — впечатление — оценка воздействия — реакция поведения — откладывание визиона в память.

Напомним о дихотомии реакции на психологическое воздействие запретом, страхом.

Знаки условны, их влияние избирательно: на своих и чужих. Поэтому знаки угрозы и предупреждения, вроде черепов хищных животных, мелового круга, острых кольев ограды, мегалитической стены, адресованные врагу и «своим», воспринимаются в диаметрально противоположном значении.

Со временем натуральные знаки угрозы и запрета меняются на условные; уже сама по себе локализация крепости имеет предупредительный характер, конкретизированный изображениями львов, грифонов, разъяренных демонов на входах в сакральное пространство замка, дворца, монастыря.

Никому конкретно не адресованные на границах перехода, на входе, экспонируются патологические образы растерзанных тел, уродливых существ, скелетов. О границе перехода в другой мир намекают костницы некоторых католических храмов Европы, стихийно сложившиеся как колумбарии из-за отсутствия мест на кладбищах, особенно в эпоху Черной смерти — чумы XIV–XV вв., когда от эпидемии вымерла треть населения.

Некоторые церкви были построены в это время во искупление грехов, и даже в их архитектурном дизайне сохранились признаки чумной эпохи. Веяние смерти исходит от готических соборов, заставляющее обходить их стороной. Возможно, поэтому они и сохранились в истории городов.

Необъяснимо, но знакомо, вероятно, каждому ощущение опасности, излучаемое зданиями больниц и кладбищенских часовен.

Прямолинейное нагнетание страха в Средневековье и пребывание в объятиях церковной морали несколько ослабело в Возрождение, освободившее, по меньшей мере, элиту общества от угнетающего чувства религиозных ограничений, что заметно сказалось на раскрепощении культуры, на сюжетах светской живописи, гуманистичной, со светлыми образами порхающих существ в росписях церковных интерьеров.

Даже леденящий душу страх оказаться подозреваемым в колдовстве, каббалистике и черной магии получал разрядку в публичных сожжениях зеленоглазых и белокурых ведьм. Это развлекало горожан; недаром последнее сожжение — конечно же в Испании, наиболее густо пропитанной суеверием и церковными фобиями — состоялось только в середине XIX в. После этого, в компенсацию потерянных острых ощущений, в Европе активизируются театры.

Патологические образы в сюжетах ужасов получили «гражданство» в гуманитарной сфере: литературе, живописи, а в последующем и в кино, наиболее достоверно изображающем акты насилия, убийства, изощренных издевательств.



Рис. 5. Сцена страшного суда на барельефном тимпане портала собора Сен-Лазар⁵

Fig. 5. The scene of the Last Judgment on the bas-relief tympanum of the portal of the Cathedral of Saint Lazare⁵

⁵ URL: <https://vyadrinkin.ru/wp-content/uploads/2020/07/Страшный-Суд-768x543.jpg>

Человек тянется к красоте, но и не отказывается от острых «теневого» воздействий на психику. Даже церковь не препятствовала появлению сатанинских сюжетов как зримого объекта праведной борьбы с темными силами преисподней. Неудивительно нейтральное отношение церкви к творчеству И. Босха, Ф. Гойи, где фигурируют персонажи, иллюстрирующие inferнальные религиозные и светские притчи (рис. 6). Индульгенцией Босха была морализаторская подоплека его мистических видений.

К тому же сюжеты средневековых ортодоксальных ужасов вышли за пределы церковной тематики, где их потенциал выразительности в XIX–XX вв. иссяк, утратил силу воздействия.

Новая волна генерирования беспредметного страха и душевной деградации претендует на более глубокое проникновение в сознание, возбуждение безотчетного нервного потрясения, не нуждающегося в предметных источниках и напрямую нацеленного на наркотическую атаку на обнаженное подсознание.

Духовную неопределенность мистических метафор успешно выражали вербально Ф. Ницше, К.Г. Юнг, З. Фрейд, а в искусстве К.Д. Фридрих, Э. Мунк, Э. Хоппер, С. Дали, З. Бексиньский (рис. 7), кинохудожник Г.Р. Гигер, создавший циклы архитектурной среды к фильмам об инопланетянах.

Все-таки средовые сюжеты с изображением пространства, в котором произошли пугающие изменения (каприччо), чаще всего представлены в архитектурных пейзажах апокалипсиса, равно как и сюжеты с «райским» будущим городов планеты.

В кино мастерски использовал психологические визионные эффекты А. Хичкок, изобретательный нагнетавший чувство ужаса у зрителей загадочными мизансценами в обычных интерьерах. В наше время для любителей острых ощущений были придуманы Дисней-парки и психологические аттракционы.

На рубеже XIX и XX вв. тема демонстрации безотчетного ужаса в самой банальной среде и в канве обычных житейских дел исчерпывающим образом была проработана в творчестве писателей-декадентов, навевавших запредельную жуть на своих читателей загадочными текстами с описанием мрачных интерьеров с задрапированными окнами, старинной мебелью, невнятными шорохами, вздохами и скрипами, портретами предков, внимательно смотрящих вам в глаза. Трудно отделаться от впечатлений соприкосновения с безотчетным страхом после чтения откровений М. Шелли, Э.А. По, В. Ирвинга, Э.Т.А. Гофмана, и конечно, А. Толстого и Н. Гоголя.

Раннехристианские мученики и потом мусульмане с радостью принимали возможность умереть во славу бога, находя в этом короткий путь к бессмертию.

Философскому обоснованию и адорации таких настроений посвятили себя С. Кьеркегор, опасавшийся оказаться в мире, оставленном богом; Ф. Ницше



Рис. 6. Сюжет из серии «капричос» Ф. Гойи⁶

Fig. 6. The plot from the series “caprichos” by F. Goya⁶



Рис. 7. Избранное из работ польского художника З. Бексиньского⁷

Fig. 7. Selected works by Polish artist Z. Beksinsky⁷

ше с правом на самоубийство как проявление свободы выбора; А. Камю, разочарованный абсурдностью жизни, лишенной здравого смысла и толкающей человека к суициду; Ж. Бодрийяр, «догадавшийся», что современная культура построена на влечении

⁶ URL: <https://rossaprimavera.ru/static/files/ac7d569a76c4.jpg>

⁷ URL: <https://proza.ru/pics/2024/12/11/1256.jpg>

к смерти, которая освобождает место для будущей жизни (кажется, он попал в точку по отношению к современному человечеству).

Всеобщее помрачение не могло обойтись без зеркального отражения в архитектуре декаданса и ее современного варианта — деконструктивизма [25], которая, конечно, не призывает прямо к самоуничтожению, но создает выразительный фон среды таким, будто разрушение уже происходит, но при этом ничего страшного не случилось.

Поистине, предшествующая цивилизация оставила нам в наследство генетику мании суицида.

Прискорбно, что движение суицидальной мысли происходит в сфере интеллектуальных коммуникаций обновления философских течений, адепты и конструкторы которых чутко улавливают пульс деградации ментальности эпохи, непроизвольно предвосхищая будущее, совсем не такое, какое хотелось бы иметь. В результате оттенки меланхолии декаданса наложились на изломанный декор модерна, а пафос победы в Великой Отечественной войне опечатан в патетике сталинского ампира.

Откровенная демонстрация победного имперского декора и общего величия сооружений в СССР 1950-х гг. представляет редкий в наше время отрицания «барочного» мышления случай классических реминисценций в «одежде» архитектуры.

В образах предлагаемых проектов авторы научились корректному изложению общей концепции пространственного решения с включением выразительной «брошки», как это делают опытные модельеры. Эта свойственная модернизму интеллигентность все же наскучила, стремление обострить образы архитектуры — а это удастся только внесением акцентов запрета и угрозы в облик здания — получило выход в брутализме, подзадориваемым лихим творчеством хиппи (рис. 8).

Знаки естественного старения и разрушения стали имитировать в новых зданиях офисов и ре-



Рис. 8. Европейский брутализм середины XX в.⁸

Fig. 8. European Brutalism of the mid-20th century⁸

⁸ URL: <https://i.pinimg.com/originals/0c/0f/80/0c0f806f2e140dd5044538958eedf050.jpg>



Рис. 9. Авангардный экстремизм современной архитектуры⁹

Fig. 9. Avant-garde extremism of modern architecture⁹

креаций изобретательными и художественно полноценными силуэтами, создающими эффект стилистического обновления. Это направление вклинилось в архитектурные находки явно угрожающего дизайнера с мотивами, вызывающими социальный протест и по меньшей мере недоумение (рис. 9).

Формалистические эксперименты, легализовавшие появление в городской среде зданий, раздражающих и пугающих горожан немасштабной громадностью глухих объемов, обилием наклонных граней, нелепых композиций, открыли при попустительстве муниципалитетов (в надежде, что появление в городе причудливых объектов вызовет приток туристов) простор для деятельности архитектурных мэтров, поощряющих друг друга Притцкеровскими премиями и не внемлющих гласу народа. Архитектура на западе стала объектом конспиративного художественного творчества, подобно скульптуре, доступной для понимания людьми, относящими себя к элите общества и мыслящими в резонанс идеям новых философов, которые, в этом нет ничего странного, исповедуют идеологию декаданса, самоустранения, нестабильности, нервного напряжения или, напротив, безвольной апатии перед грядущим.

Искусство, культивирующее такие мотивы безысходности, реверсивно усиливает общую паранормальность мировоззрения, пораженного эпидемией «декона» и выводящего на поверхность культурной жизни своих кумиров: П. Пикассо, А. Модильяни, С. Дали, Ф. Маринетти и иже с ними. Неудивительно, что в обновленческой идеологии тоталитарного искусства государственных режимов Италии, Германии, СССР работы авангардистов были объявлены образцами безумия и разложения (с чем можно согласиться), предложив обратиться к образам молодого здорового тела. В манифесте футуризма

⁹ URL: https://images.adsttc.com/media/images/6687/0721/483c/b372/b9c9/cac7/large_jpg/_1.jpg?1720125224

Ф. Маринетти провозгласил, что нет шедевра, если он не имеет агрессивного духа; мы хотим восславить войну — единственную гигиену мира, милитаризм и патриотизм. Вот такой поворот. Агрессивность прямо или косвенно выражена и в архитектуре этих стран предвоенной эпохи 1940-х гг. «И танки наши быстры» пели советские люди на первомайских демонстрациях.

Горестные знаки минувших войн отображены в мемориалах. А ожидание новой войны имеет свою символику во всем — в искусстве, в величии архитектуры, имеющей строгий геометризм, симметрию, грозную символику.

Современная архитектура произвольно демонстрирует апокалиптические визионы в виде тесно сплоченных кубовидных многоэтажных домов темной окраски, возникающих, в частности, на периферии Москвы. Со стороны они выглядят откровенно угрожающими (рис. 10).

Отдельные новостройки в городах, имеющие градостроительное значение пространственных акцентов, вызывают ощущение опасности, особенно неожиданной скоростью возведения, непривычной для горожан, и являют собой, главным образом, творческую манифестацию автора, по-своему понимающего контекст среды.

К ним относятся странные затеи муниципалитетов больших городов обзавестись заметным архитектурным объектом в порядке PR.

Характерно, что сегодня ни одна амбициозная новостройка не вызывает позитивных эмоций, они явно нацелены на архитектурное сопровождение процесса апокалипсиса и запрещают своим видом приближаться к ней, предупреждая об опасности знакомства с неведомым существом.

Интересно, что строящиеся одновременно по инициативе церкви храмы в российских городах



Рис. 10. Кластеры жилых групп новостроек Москвы¹⁰

Fig. 10. Clusters of residential groups of new buildings in Moscow¹⁰

¹⁰ URL: https://webpulse.imgsmai.ru/imgpreview?mb=webpulse&key=pulse_cabinet-image-f8556772-1f1d-457a-bc82-403b6903845a

вызывают, напротив, впечатление человечности, масштабности и позитива, хотя и существует резонное мнение, что Россия — светское государство.

В цивилизованной среде знаки угрозы смягчаются до сигнала запрета асоциальных действий, направленных на поддержание порядка в городе.

Такой запрет несут в себе скамьи, вмонтированные в антивандальные основания, перегородки на скамьях остановок, не позволяющие укладываться на ночлег, шипы на спинках скамей — для любителей посидеть на них с ногами и т.п.¹¹ [26].

Все же основной угрозой, олицетворяющей социальный дисбаланс, является антигуманная архитектура, ее внутреннее пространство, поглощающее и выбрасывающее потоки людей и машин, ее отчужденный от привычных эстетических и этических норм ритм жизни наводит на подтверждение диагноза о болезни цивилизации.

Совокупный образ архитектуры, потерявшей ориентиры развития и черты ансамбля, подобно лицу больного человека свидетельствует о приближении к распаду целесообразных связей между сферами социальной жизни.

Позитивный опыт древних в организации «правильных» ансамблей городов и парадных магистралей ненадолго вернулся в эпоху Возрождения; в период германского фашизма идеи упорядочения городов исходили из утверждения принципов арийского превосходства с подавлением и устрашением окрестного мира.

Пульсация акций сатанинской символики и преступного антигуманизма обозначилась в тени благополучного постиндустриального общества, где возникли закрытые секты, привлекающие людей с извращенной психикой, устраивающих ритуальные убийства; почти открыто существуют публичные дома с девушками-ампутантами, секты религиозных фанатов флагеллантов, умерщвляющих свою плоть самобичеванием во искупление грехов.

Тотальное безумие, скрытое тонкой оболочкой благополучного бытия, подогревается информационными системами, точно реагирующими на расширяющийся интерес к патологии преступности, сексуальным извращениям, активизации движения ЛГБТ, безответственной пропаганде смены пола детей, неотенической (впадение в детство) образности архитектуры, адорации абстрактного искусства, пропитанного сюжетами смертельного ужаса, и наконец — кластеров, скоплений многоэтажных зданий, вид которых не свидетельствует об их предназначении человеку, ибо это — издержки стихийного градостроительства.

Все это — продукция сознательной или интуитивной деятельности людей, не задающих себе вопрос о том, чем все это кончится.

¹¹ Городские шипы: враждебная архитектура и ее скрытые смыслы. Пространство, сентябрь 03.2024. URL: telegra.ph

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

А кончиться может вот чем. Даже если не случится в ближайшее время истребляющая все ядерная война, некоторым образом спасающая человечество от позорной гибели от эпидемий, разврата, преступности и духовного распада, когда биосфера получит возможность отдохнуть от человека и возобновить цикл эволюции со следующей попыткой культивирования разумной цивилизации, человечеству надлежит найти или создать такой институт глобального единения, который остановит на время гибель или придаст благородный оттенок финишу расы; пока, кроме церкви, подтвердившей свой опыт исторического влияния на разум и волю народов, это сделать некому, при том что и сама церковь должна очиститься от исторических наслоений, недостойных пастыря — в ее анналах есть попытки отказа от фантастических небылиц в становлении стержня объединения, экуменизации, попытки различных видов протестантизма снять прессинг веры в богочеловека. Идеи коммунизма тоже оказались преждевременными.

Но, скорее всего, человечество должно пройти через точку сингулярности, обозначающей неконтролируемый человеком крах существующего мира, и обновиться после катастрофы и страданий.

Как смягчить удар, обойтись малыми потерями? Религиозными реформами? Это был бы странный вывод для атеиста и архитектора, верящего в реальные предметные преобразования мира, а не сюрреализм божественной веры.

Экстравагантные силуэты авангардистской архитектуры, деформация архитектурных образов в безобидных картинках «каприччо», изображающих апокалиптические сюжеты, как бы морально готовят людей к видениям поверженных в прах городов (хотя для аналогичного впечатления достаточно посмотреть на руины украинских и сирийских городов, разграбленную Пальмиру), и безмолвно предупреждают, что накопление в сознании людей привычки равнодушно взирать на остовы зданий споспешествует безнаказанной подготовке окончательного удара по цивилизации. Кто и зачем его готовит?

Или это тайная акция маньяков международной секты по сокращению населения Земли?

Архитектура в этих событиях предстает очевидным индикатором накопления взрывного заряда. Явления угрожающего, беспощадного вышли из тени. Может быть, их предъявление заставит одуматься?

Общество, обычно настроенное позитивно к перспективам цивилизации, сегодня осознает собственное помутнение разума, толкающее землян к суициду. На информационной поверхности мировоззрения светятся знаки, демонстрирующие различные уровни психоза, вполне осознаваемого, но фатально неприкасаемого как объект нейтрализации.

Это не алармизм. Это предъявление фактов эволюции общественного сознания, эскалации его зомбированности и слепого марша к пропасти небытия. Обидно, что этот крестный ход совершается на фоне великолепных технических и культурных достижений.

Предустановленность финала расы осуществляется усилиями самого человека самыми примитивными средствами.

Сегодня противостояние может быть выражено не прямыми угрозами, а «игрой мускулов», намекающей на действительные или мнимые превосходства, даже не прибегая к устрашающей архитектуре, ассоциативное мышление обходится без визионов — дух апартеида, например, воспринимается интуитивно.

Кроме когнитивных функций угрожающая и запретительная информация имеет конкретно направленное указание к действиям. Но отпугивающих знаков в виде символов и текстов, обязывающих покинуть запретную территорию, недостаточно. Их подкрепляют силовыми угрозами. Это известные сценарии противостояния «двух баранов». Метафорическая игра наращивания аргументов «ах, ты так!» завершается, как правило, реальной пробой сил. И аннигиляцией, такой привлекательной в изображениях руин городов.

В международном масштабе отключение разума при эскалации подобного противостояния удастся притормозить упоминанием памятников предшествующих войн, наивными попытками создания интернациональных комитетов, строительства дворцов мира, приглашающих к взаимопониманию. История не подтверждает успешность таких попыток. Что-то здесь напоминает строительство Вавилонской башни.

Архитекторы, владеющие тайной воздействия среды обитания на людей и понимающие лучше других знаки деградации мира, в силу складывающихся отношений в сфере строительства отчуждаются не только от наблюдения стройки, но и от проектирования, которое теперь происходит в утробе компьютера, как следствие, утрачивают представление о реальном воздействии на сознание сограждан облика выросшего сооружения, и, понятно, теряют право голоса при обсуждении чужеродного тела в знакомой городской среде. Так идет процесс самопостроения Молоха хаоса в атмосфере общественной безмятежности, которой собственные СМИ прививают спокойное отношение к картинам вандализма и погрома сложившейся застройки.

Иными словами, мы безоружны перед лавиной всеобъемлющего социального зла, неотвратимо надвигающегося на планету, и истоки этого зла — мы сами.

С кем же бороться?

Решайте, граждане планеты, пока она не стрянула нас как послед неудачного биологического эксперимента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Штейнбах Х.Э., Еленский В.И. Психология жизненного пространства. СПб. : Речь, 2004. 239 с.
2. Сомов Г.Ю. Уровни средообразования // Городская среда : сб. мат. Всесоюзной науч. конф. Ч. 2. М. : ВНИИТАГ, 1989. С. 116–124.
3. Сомов Г.Ю. Эмоциональное воздействие архитектурной среды и ее организация // Архитектура и эмоциональный мир человека. М. : Стройиздат, 1985. С. 82–149.
4. Dobzhansky T. The Genetic Basis of Evolution // Scientific American. 1950. Vol. 182. Issue 1. Pp. 32–41. DOI: 10.1038/scientificamerican0150-32
5. Hall E. The silent language. Knopf Doubleday Publishing Group, 1980. 224 p.
6. Гамильтон-Томпсон А. Английский замок. Средневековая оборонительная архитектура М., 2011.
7. Жарков С.В. Рыцарские замки, метательные машины и пушки средневековья. Минск : Друк-С, 2006. 177 с.
8. Иванов К. Средневековый замок, город, деревня и их обитатели. М. : Ломоносовъ, 2015.
9. Мески Ж. Замки в средние века. М. : Астрель-АСТ, 2003.
10. Окиотт Э. Рыцарь и его замок. Средневековые крепости и осадные сооружения. М., 2007.
11. Виолле-ле-Дюк Э.Э. Осада и оборона крепостей. Двадцать два столетия осадного вооружения. М. : Центрполиграф, 2022.
12. Громов И.П. Фортификационные сооружения средневековья // Архитектура и строительство. 2021.
13. Кузнецов В.В. Фортификационная архитектура: история и современность // Архитектурное наследие. 2020.
14. Исаков Е.В., Орлов В.П. Кронштадт: архитектура, история, фортификация. СПб. : Крига, 2017. 600 с.
15. Яковлев В.В. Эволюция долговременной фортификации // Государственное военное издательство Наркомата обороны СССР. 1931.
16. Федоров В.В., Скибина Е.В. Феномен архитектурных руин // Вестник МГСУ. 2013. № 8. С. 7–13. EDN RAFVGZ.
17. Бугрова Е.Д. Индустриальные руины: эстетика modern decay и туризм // Labyrinth: теории и практики культуры. 2022. № 3. С. 16–23. DOI: 10.54347/Lab.2022.3.2. EDN QOIEJE.
18. Ухнаев А.Е. Руины. Время. Архитектура // Архитектурный вестник. 1997. № 4. С. 61–69.
19. Яхья М.Я., Салил М.Я. Война с красотой. Почему современная архитектура стала уродливым лицом нашей жизни // Молодой ученый. 2022. № 4 (399). С. 465–469. EDN PPZAZV.
20. Чернышова Э.П. Феноменология архитектурной формы: влияние архитектурно-пространственных форм на психику человека // Сборник научных трудов SWorld. 2013. Т. 49. № 3. С. 59–62. EDN RFUYBH.
21. Седых А. Кризис современной архитектуры. URL: <https://www.rmnt.ru/story/realty/krizis-sovremennoy-arxitektury.373409/>
22. Тутов А.Л. Современная архитектурная среда и ее влияние на поведение человека // Архитектон: известия вузов. 2004. № 1 (6).
23. Фрейд З. Введение в психоанализ. Лекции. М. : Наука, 1989.
24. Бычков В. Эстетика. М. : Гардарики, 2008. 564 с.
25. Салингарос Н. Анти-архитектура и деконструкция: триумф нигилизма. М. ; Екатеринбург : Кабинетный ученый, 2017. 296 с. EDN XTVQRQ.
26. Ромашкина С. Агрессивная архитектура. URL: vlast.kz

Поступила в редакцию 13 февраля 2025 г.

Принята в доработанном виде 5 марта 2025 г.

Одобрена для публикации 5 марта 2025 г.

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

REFERENCES

1. Steinbach H.E., Elensky V.I. *Psychology of living space*. St. Petersburg, Rech', 2004; 239. (rus.).
2. Somov G.Yu. Levels of environmental formation. *Urban environment : collection of materials of the All-Union scientific conference. Part 2*. Moscow, VNIITAG, 1989; 116-124. (rus.).
3. Somov G.Yu. Emotional impact of the architectural environment and its organization. *Architecture and*

- the Emotional World of Man*. Moscow, Stroyizdat, 1985; 82-149. (rus.).
4. Dobzhansky T. The Genetic Basis of Evolution. *Scientific American*. 1950; 182(1):32-41. DOI: 10.1038/scientificamerican0150-32
 5. Hall E. *The silent language*. Knopf Doubleday Publishing Group, 1980; 224.
 6. Hamilton-Thompson A. *English castle. Medieval defensive architecture*. Moscow, 2011. (rus.).
 7. Zharkov S.V. *Knights' castles, throwing machines and cannons of the Middle Ages*. Minsk, Druk-S, 2006; 177. (rus.).
 8. Ivanov K. *Medieval castle, town, village and their inhabitants*. Moscow, Lomonosov, 2015. (rus.).
 9. Meski J. *Castles in the Middle Ages*. Moscow, Astrel-AST, 2003. (rus.).
 10. Oakshott E. The knight and his castle. *Medieval fortresses and siege structures*. Moscow, 2007. (rus.).
 11. Viollet-le-Duc E.E. Siege and defense of fortresses. *Twenty-two centuries of siege weapons*. Moscow, Tsentrpoligraf, 2022. (rus.).
 12. Gromov I.P. Fortifications of the Middle Ages. *Architecture and Construction*. 2021. (rus.).
 13. Kuznetsov V.V. Fortification architecture: history and modernity. *Architectural Heritage*. 2020. (rus.).
 14. Isakov E.V., Orlov V.P. *Kronstadt: architecture, history, fortification*. St. Petersburg, Kriga, 2017; 600. (rus.).
 15. Yakovlev V.V. Evolution of long-term fortification. *State military publishing house of the People's Commissariat of Defense of the USSR*. 1931. (rus.).
 16. Fedorov V.V., Skibina E.V. Architectural ruins phenomenon. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013; 8:7-13. EDN RAFVGZ. (rus.).
 17. Bugrova E.D. Industrial ruins: modern decay and tourism. *Labyrinth: Theories and Practices of Culture*. 2022; 3:16-23. DOI: 10.54347/Lab.2022.3.2. EDN QOIEJE. (rus.).
 18. Ukhnaev A.E. Ruins. Time. Architecture. *Architectural Bulletin*. 1997; 4:61-69. (rus.).
 19. Yakh'ya M.Ya., Salil M.Ya. The war with beauty. Why modern architecture has become the ugly face of our lives. *Young Scientist*. 2022; 4(399):465-469. EDN PPZAZV. (rus.).
 20. Chernysheva E.P. The phenomenology of architectural form: the influence of architectural and spatial forms on the human psyche. *Collection of scientific papers SWorld*. 2013; 49(3):59-62. EDN RFUYBH. (rus.).
 21. Sedykh A. *The crisis of modern architecture*. URL: <https://www.rmnt.ru/story/realty/krizis-sovremennoy-arxitektury.373409/>
 22. Titov A.L. Modern architectural environment and its influence on human behavior. *Architecton: News of Universities*. 2004; 1(6). (rus.).
 23. Freud Z. *Introduction to psychoanalysis. Lectures*. Moscow, Nauka, 1989. (rus.).
 24. Bychkov V. *Aesthetics*. Moscow, Gardariki, 2008; 564. (rus.).
 25. Salingaros N. *Anti-architecture and deconstruction: the triumph of nihilism*. Moscow; Yekaterinburg, Cabinet Scientist, 2017; 296. EDN XTVQRQ. (rus.).
 26. Romashkina S. *Aggressive architecture*. URL: vlast.kz

Received February 13, 2025.

Adopted in revised form on March 5, 2025.

Approved for publication on March 5, 2025.

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

Деревянные церкви нижней Онеги XVII–XIX веков. Типологический аспект

Андрей Борисович Бодэ^{1,2,3}, Татьяна Валентиновна Жигальцова^{3,4}

¹ Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства — филиал Центрального научно-исследовательского и проектного института Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (НИИТИАГ — филиал ЦНИИП Минстроя России); г. Москва, Россия;

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

³ Автономная некоммерческая организация «Исследование и реставрация памятников деревянного зодчества “Традиция”»; г. Москва, Россия;

⁴ Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ); г. Архангельск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Значимость исследования определяется исключительной важностью деревянного зодчества для русской культуры, как одного из ярких и самобытных направлений. Исследуемая территория отличается высокой строительной активностью и расцветом в развитии архитектуры. Деревянные храмы нижней Онеги представляют собой сильную и выдающуюся архитектурную традицию, которая изучена недостаточно. Предметом исследования является строительная история объектов, строительная периодизация, типология, эволюция архитектурных форм. Научная гипотеза исследования заключается в том, что типологическое богатство деревянных храмов нижней Онеги объясняется важной ролью этой территории в процессе освоения Русского Севера как узла взаимосвязи материковой и морской частей и соответственно разных региональных традиций.

Материалы и методы. Материалами для исследования служат результаты натурного обследования объектов в совокупности с архивно-библиографическими историческими источниками. Комплексный методический подход сочетает практические научно-реставрационные методы изучения объектов и научные методы историко-архитектурного, сравнительно-типологического и эволюционного анализа.

Результаты. По каждому исследуемому объекту выявлен комплекс исторических источников, проведены натурные обследования, раскрыты строительная история и первоначальный архитектурный облик, введен в научный оборот ряд новых объектов, не изученных ранее. Определена типология исследуемых объектов, проанализированы типологические характеристики, составлены графические типологические ряды, одновременно отражающие процессы эволюции архитектурных форм. Сопоставление исследуемых традиций с развитием архитектуры других северорусских территорий позволило определить приемы и формы, отличающие данный регион. Впервые получена развернутая картина типологического многообразия архитектуры храмов нижней Онеги во взаимосвязи с традициями церковного строительства Русского Севера в целом.

Выводы. Изучение деревянных церквей нижней Онеги дает фундаментальные научные знания о развитии русской архитектуры, ее истории, типологии, эволюции. Исследование позволяет обрисовать и детализировать лучшие достижения русской строительной культуры и более полноценно ввести их в контекст культуры мира. Результаты исследования будут использованы при разработке научно-проектной документации и проведении работ по сохранению деревянных объектов культурного наследия нижней Онеги.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: деревянные церкви, региональные традиции, архитектурная типология, нижняя Онега, реставрация

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-28-01625 «Деревянные храмы нижней Онеги XVII–XIX веков. Архитектура, типология, традиции» (URL: <https://rscf.ru/project/24-28-01625/>). Авторы выражают благодарность рецензентам статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бодэ А.Б., Жигальцова Т.В. Деревянные церкви нижней Онеги XVII–XIX веков. Типологический аспект // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 4. С. 496–505. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.496-505

Автор, ответственный за переписку: Андрей Борисович Бодэ, bode-niitag@yandex.ru.

Wooden churches of the lower Onega of the XVII–XIX centuries. Typological aspect

Andrey B. Bode^{1,2,3}, Tatiana V. Zhigaltsova^{3,4}

¹ *Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Planning — a branch of the Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation (NIITAG — a branch of TSNIP of the Ministry of Construction of Russia); Moscow, Russian Federation;*

² *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;*

³ *Autonomous non-profit organization Research and restoration of monuments of wooden architecture “Tradition”; Moscow, Russian Federation;*

⁴ *Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; Arkhangelsk, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The significance of the study is determined by the exceptional importance of wooden architecture for Russian culture as one of its most outstanding and authentic phenomena. The studied territory is distinguished by high construction activity and flourishing development of architecture. The wooden churches of the lower Onega feature a very strong and outstanding architectural tradition, that has not been studied sufficiently. The research subject is the construction history of the objects of wooden architecture, their construction periodization, typology, and evolution of architectural forms. The scientific hypothesis of the study runs that the typological diversity of wooden churches of the lower Onega is explained by the important role of this territory in the process of the Russian North exploration, it being a point of contact of the mainland and marine areas and hence different regional traditions.

Materials and methods. The research materials included the results of field observations of architectural objects in conjunction with the study of archival bibliographical historical sources. The applied comprehensive methodological approach combined practical scientific and restoration study methods and scientific methods of historical and architectural, comparative-typological and evolution analysis.

Results. A collection of historical sources for each object under study was identified, field observations were conducted, and construction history and original architectural appearances were revealed; a series of new objects, completely unexplored before, were introduced into scientific discourse. The typology of the studied objects was determined, their typological characteristics analyzed and typological graphical sets, reflecting the evolution processes of the architectural forms, were compiled. The comparison of the studied traditions with the development of architecture in other Russian North territories allowed for the identification of the techniques and the forms that distinguish this territory. For the first time, a detailed picture of typological diversity of the architecture of the lower Onega churches in connection with the traditions of church construction in the Russian North as a whole, was obtained.

Conclusions. The study of wooden churches of the lower Onega provides fundamental scientific knowledge of the development of Russian architecture, its history, typology, and evolution. The research made it possible to outline and detail the best achievements of the Russian construction culture and introduce them more meaningfully into the broader context of the world's culture. The results of the study will be used for drafting scientific and project documentation and conducting works for preservation of cultural heritage objects of the lower Onega.

KEYWORDS: wooden churches, regional traditions, lower Onega, restoration

Acknowledgements. The research was supported by the Russian Science Foundation within the project no. 24-28-01625 “Wooden Churches of the Lower Onega of the XVII–XIX Centuries. Architecture, Typology, Traditions” (URL: <https://rscf.ru/project/24-28-01625/>). The authors express their gratitude to the reviewers of the article.

FOR CITATION: Bode A.B., Zhigaltsova T.V. Wooden churches of the lower Onega of the XVII–XIX centuries. Typological aspect. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(4):496-505. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.496-505 (rus.).

Corresponding author: Andrey B. Bode, bode-niitag@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Русское деревянное зодчество по настоящее время остается недостаточно изученным. С одной стороны, количество объектов очень велико, как и территория, на которой они располагаются, с другой стороны, изучение памятников деревянного зодчества — сфера довольно узкая, и количество исследователей относительно невелико [1]. Значимость исследования определяется исключительной важностью русского деревянного зодчества, как одного из ярких и самобытных проявлений национальной культуры.

Исследуемый регион — земли, омываемые Онегой в нижнем течении. Выход к морю обусловил важную роль нижней Онеги в процессе освоения Русского Севера и высокую строительную активность и расцвет в развитии архитектуры. Деревянные храмы нижней Онеги впервые исследуются как целостная группа, объединенная единой строительной традицией.

Цель работы — комплексное изучение деревянных храмов нижней Онеги XVII–XIX вв. в архитектурном, конструктивном, типологическом и эстетическом аспектах, выявление их регионального своеобразия и взаимосвязей с общерусскими архи-

тектурными традициями. Задачи включают: сбор архивно-исторических данных по исследуемым объектам; натурное обследование объектов с архитектурными обмерами; выявление строительной истории и периодизации исследуемых объектов; выполнение графических реконструкций объектов на разные строительные этапы; сравнительно-типологический анализ объектов исследования; сопоставление развития архитектурных традиций Онежского Поморья с общим ходом развития деревянного зодчества всего Русского Севера.

Научная гипотеза исследования заключается в том, что типологическое богатство деревянных храмов нижней Онеги объясняется ролью этой территории в процессе освоения Русского Севера как узла взаимосвязи материковой и морской частей и соответственно разных региональных традиций.

Первые этапы изучения русского деревянного зодчества восходят к концу XIX – первой половине XX в., когда приоритетной задачей исследователей был сбор материала [2]. К специальному изучению истории деревянной архитектуры, осмыслению процессов и явлений в его развитии исследователи обратились с 1960–1970-х гг. Крупнейшие обобщающие работы о деревянном церковном зодчестве, где рассматриваются вопросы типологии, эволюции архитектурных форм, особенности региональных традиций, принадлежат А.В. Ополовникову [3], В.П. Орфинскому [4], И.Н. Шургину [5], Е.В. Ходаковскому [6, 7].

Указанный труд В.П. Орфинского выделяется тем, что это наиболее систематизированное и развернутое типологическое исследование церковных построек [4]. Однако в нем недостаточен региональный аспект, что собственно и не входило в задачи исследования. А.В. Ополовников, напротив, региональным традициям уделял немало внимания [3], но типология в его работах представлена упрощенно. Изучению региональных традиций, в том числе в церковном зодчестве, посвящены публикации Г.В. Алферовой, Е.А. Ащепкова, Е.Н. Бубнова, Т.И. Вахрамеевой, А.А. Галашевича, С.Я. Забелло, Б.П. Зайцева, Н.П. Крадина, В.А. Крохина, Л.М. Лисенко, А.Г. Носковой, С.А. Пиляка, А.Т. Яскеляйна и др. Их работы представляют собой исследования отдельных памятников, групп объектов, связанных единой территорией или традицией, архитектурно-конструктивных особенностей, вопросов эволюции. Источниковедение по объектам деревянного зодчества систематизировано и обобщено в исследовании Е.В. Ходаковского и А.Г. Носковой [8].

Перечисленные работы в своей совокупности позволяют глубже понять региональные особенности, специфику и характер развития традиционного деревянного зодчества. Хотя в целом местные особенности деревянных храмов в совокупности с типологией до сих пор недостаточно изучены. При наличии весьма обстоятельных и углубленных работ

по деревянному зодчеству Карелии, Архангельской области имеются лишь фрагментарные исследования. Деревянное зодчество нижнего Поонежья специально не рассматривалось ни в одной научно-исследовательской работе.

Для изучения деревянной архитектуры нижней Онеги очень важна публикация, освещающая исторические источники по церковному строительству [9]. Также в одном из трудов Е.В. Ходаковского, посвященном архитектурно-строительным преобразованиям Нового времени, много внимания уделено архитектуре объектов нижней Онеги [10]. В ряде публикаций представлены материалы изучения отдельных разрозненных объектов нижней Онеги, например церкви Казанской иконы Божией Матери в Фёхтальме [11], храмов в Сырье [12], Большом Бору [13].

Деревянные храмы нижней Онеги представляют собой сильную и выдающуюся архитектурную традицию. Их изучение дает фундаментальные научные знания о развитии русской архитектуры, ее истории, типологии, эволюции. Исследование позволяет обрисовать и детализировать лучшие достижения русской строительной культуры и более полноценно ввести их в контекст культуры мира.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являются типологические группы церквей нижней Онеги XVII–XIX вв. Используется комплексный подход, сочетающий практические научно-реставрационные методы изучения памятников с научными методами сравнительно-типологического, исторического и эволюционного анализа. Деревянные храмы Онежского Поморья исследуются как целостная группа, объединенная единой строительной традицией.

Начальная стадия работы включает сбор обобщающего материала по истории края, его освоению и заселению, характеризуется его роль в системе торгово-экономических связей Севера. Далее осуществляется сбор материалов по объектам, включающий сведения по истории и строительству в архивах Москвы, Санкт-Петербурга, Архангельска, и натурные обследования памятников, которые позволяют выявить следы строительной истории. Совокупный анализ данных натурных обследований и архивно-библиографических сведений служит для определения первоначального архитектурного облика и строительных этапов, через которые прошел памятник.

Типологический и эволюционный анализ архитектуры храмов нижней Онеги позволяет выявить их типологию, сопоставить с иными традициями Севера, определить характерные региональные особенности и своеобразие, и в итоге определить место исследуемой группы объектов в общем ходе развития русского деревянного зодчества. Методом обобщения получается целостная и полная картина

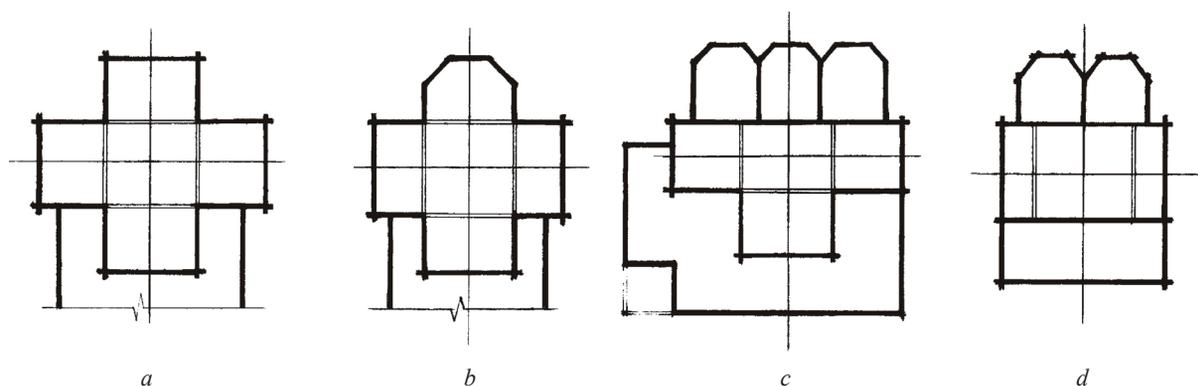


Рис. 2. Преобразование крещатой структуры плана церквей нижнего Поонежья в XVII – конце XVIII в. Схемы планов: *a* — Вознесенская церковь 1654 г. в д. Пияла; *b* — Преображенская церковь 1678 г. в с. Чекуево; *c* — Владимирская церковь 1757 г. в с. Подпорожье; *d* — Ильинская церковь 1786 г. в с. Вазенцы

Fig. 2. The transformation of the cross-shaped structure in church design in the lower reaches of the Onega river in the XVII – end of the XVIII century. Schemes of plans: *a* — Ascension church of 1654 in the village of Piyala; *b* — Transfiguration church of 1678 in the village of Chekuevo; *c* — Vladimir church of 1757 in the village of Podporozhye; *d* — Ilyinskaya church of 1786 in the village of Vazentsy

расширить представление об архитектуре региона и приблизиться к полноте охвата предмета исследования.

Сравнительно-типологический анализ при использовании методических разработок В.П. Орфинского и И.Е. Гришиной (Типология деревянного культового зодчества Русского Севера. Петрозаводск, 2004. 280 с.) [4] дал возможность выявить типологическое родство указанных трех построек и определить тенденцию формообразования плана от правильного крещатого сруба к сложной структуре, построенной на основе равноконечного креста (рис. 2). Таблица дополнена некоторыми утраченными объектами, структура которых подтверждает выявленную закономерность. Первоначальная лаконичность плана усложняется за счет членения формы внутри себя и за счет добавления новых объемов.

Крещатая форма плана сочетается как с шатровым, так и с кубоватым верхом. Шатровые формы древнее, кубоватые завершения распространяются в регионе Поонежье и Поморье с последней трети XVII в., постепенно вытесняя шатровые верхи [16]. В соответствии с этой тенденцией все более поздние объекты имеют кубоватые завершения.

Форма куба, как церковного верха, получила наибольшее распространение в районе нижней Онеги [3]. Ранние кубоватые храмы последней трети XVII в. имели в основе простой четверик. В XVIII в. кубами завершались и четвериковые, и крещатые в основании постройки. В XIX в. объемно-планировочная структура кубоватых храмов вновь упрощается. Типология кубоватых церквей представлена в хронологической последовательности и отображает соответственно и эволюцию форм основания (рис. 3). Выявлено изменение пропорций от стройных высоких четвериков до массивных приземистых оснований. Эта тенденция соответствует

общим изменениям в деревянном зодчестве Севера XVII–XIX вв. [17].

Выявлена эволюция формы кубоватых завершений. Как показывают исследования сопредельного региона — онежского Поморья [18], изначально с XVII в. существовали варианты одноглавого завершения куба. Смоделирован эволюционно-типологический ряд кубоватых верхов, построенный по принципу от простого к сложному (рис. 4). Он показывает типологическое многообразие и тенденцию изменения форм, выражающуюся в утрате первоначальной пластичности и приближении к форме классицистического купола в соответствии с новыми архитектурными влияниями [19]. В последней трети XVII в. определенно наблюдается расцвет в традиции строительства кубоватых храмов. Он выражается в большом количестве строившихся объектов и выразительности их архитектурных решений. Лучшими образцами ранних кубоватых храмов являются Вознесенская церковь 1669 г. в с. Кушереецкое, Сретенская церковь 1677 г. в с. Чекуево, Крестовоздвиженская церковь 1696 г. в с. Усть-Кожа.

При некотором спаде строительства в первой половине XVIII в., во второй половине столетия происходит вновь оживление и новое качественное изменение архитектуры кубоватых церквей. Строятся крупномасштабные объекты на основе развитого крещатого плана с усложненным многоглавым верхом. Примеры этого — Владимирская церковь 1757 г. в с. Подпорожье, Преображенская церковь 1786 г. в с. Турчасово и др.

В первой трети XIX в. в связи с новой регламентацией церковного строительства происходит своеобразное соединение традиционных форм деревянного зодчества с приемами, заимствованными из стилиевой архитектуры [20]. На объектах нижней Онеги оно выражается в распространении одноглавых завершений, с одной стороны, похожих на клас-

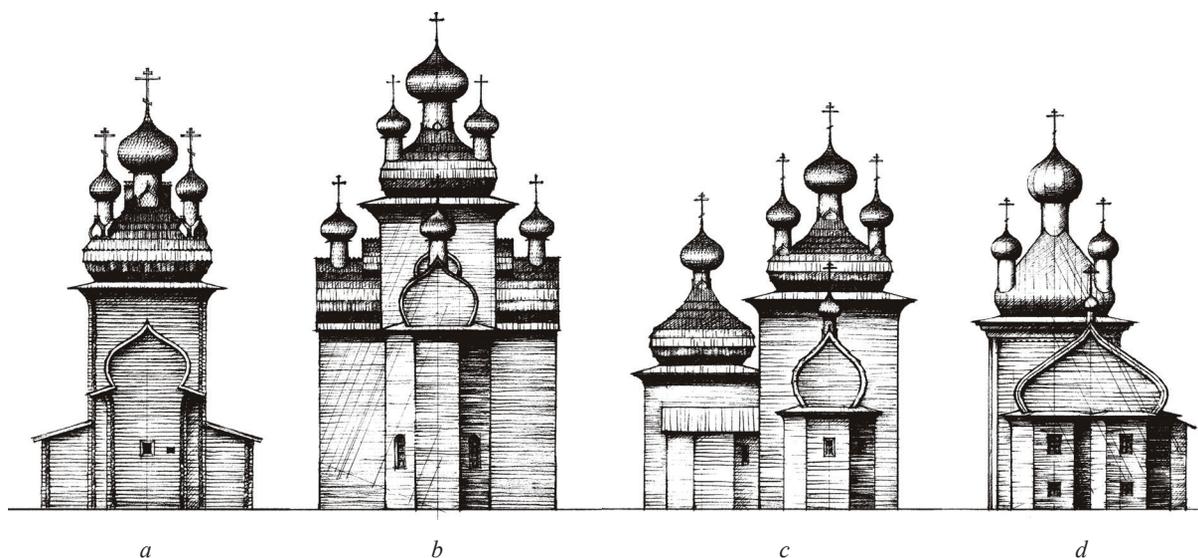


Рис. 3. Объемно-плановые решения кубоватых храмов в XVII – конце XVIII в.: *a* — Вознесенская церковь 1669 г. в с. Кушеретское; *b* — Преображенская церковь 1687 г. в с. Чекуево; *c* — Троицкая церковь 1725 г. в с. Подпорожье; *d* — Троицкая церковь 1724 г. в с. Пабережское

Fig. 3. Volume-plan solutions of cube-shaped churches in the XVII – end of the XVIII century: *a* — Ascension church of 1669 in the village of Kusheretskoe; *b* — Transfiguration church of 1687 in the village of Chekuevo; *c* — Trinity church of 1725 in the village of Podporozhye; *d* — Trinity church of 1724 in the village of Paberezskoe

сицистические решения, с другой — имеющих глубокие традиционные корни. Примерами поздних кубоватых построек являются Богоявленская церковь 1850-х гг. в д. Поле, Никольская церковь 1867 г. в д. Сырья и др.

Сопоставление исследуемых традиций с развитием архитектуры других северорусских территорий позволило определить приемы и формы, отличающие данный регион. К ним относятся строительство крещатых в плане церквей, которые в XVII в. были покрыты шатрами, а позже в конце

XVII в. и вплоть до конца XVIII в. имели кубоватые многоглавые завершения. Традиция строительства крещатых церквей имеет связи с сопредельными регионами — Поморьем и северными вологодскими землями. Это позволяет сделать вывод о том, что распространение на Севере крещатых храмов происходило из центра страны к окраинам и проводником служила р. Онега, будучи одной из основных северных транспортных артерий.

Традиция строительства церквей с кубоватыми завершениями — местное явление, очагом распро-

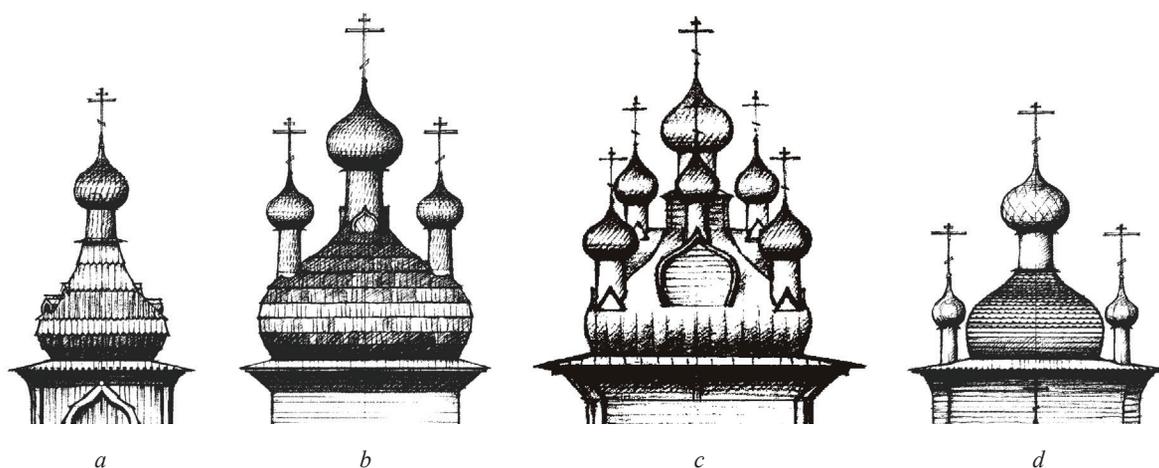


Рис. 4. Типологический ряд форм завершений кубоватых храмов в XVII – конце XVIII в.: *a* — Пятницкая церковь в с. Шуеретское последней трети XVII в.; *b* — Климентовская церковь 1685 г. в с. Пияла; *c* — Никольская церковь 1678 г. в д. Бережная Дуброва; *d* — Ильинская церковь 1798 г. Ильинско-Водлозерского погоста

Fig. 4. A typology of top parts of cube-shaped churches in the XVII – end of the XVIII century: *a* — St. Paraskevi Church (late 17th century) in the village of Shuyeretskoye; *b* — St. Clement Church (1685) in the village of Piyala; *c* — St. Nicholas Church (1678) in the village of Berezhnaya Dubrova; *d* — St. Elijah Church (1798) in the Il'yinsky-Vodlozersky Pogost

странения которого в XVII в. была нижняя Онега. Причина появления подобной формы в качестве церковного завершения — московские (центрально-русские) влияния, получившие региональные интерпретации в соответствии с местными условиями и при взаимодействии с предшествующим более древним архитектурным пластом, привнесенным в период колонизации Севера новгородцами [21]. В XVIII в. ареал распространения кубоватых храмов существенно расширяется и появляются новые преобразования архитектурных форм.

Таким образом, архитектурные традиции нижней Онеги, сформировавшиеся как соединение разных влияний, впоследствии, уже обладая яркой индивидуальностью, сами оказывали влияние на архитектуру сопредельных территорий. Подтверждается научная гипотеза исследования, заключающаяся в том, что типологическое богатство деревянных храмов нижней Онеги сформировалось благодаря особой роли этой территории в процессе освоения Русского Севера и сосредоточению разных региональных историко-культурных взаимодействий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного исследования впервые получена развернутая картина типологического многообразия архитектуры храмов нижней Онеги во взаимосвязи с традициями церковного строительства Русского Севера в целом. Раскрыта строительная история объектов, выявлен комплекс новых архивно-исторических источников,

введен в научный оборот ряд новых объектов.атурные обследования дали графический материал, показывающий объекты в реконструкциях первоначального облика. Типологический и эволюционный анализ архитектуры храмов Онежского Поморья позволил выявить их своеобразие, сопоставить с иными традициями Севера и в итоге определить место в общем ходе развития русского деревянного зодчества.

Изучаемые деревянные храмы XVII–XIX вв. нижней Онеги являются объектами культурного наследия федерального или регионального значения, охраняемыми государством. Россия в целом отличается большим объемом работ по реставрации деревянных объектов [22]. Полученные результаты исследования будут использованы при разработке научно-проектной документации для проведения работ по сохранению объектов культурного наследия. Авторы статьи активно работают в сфере реставрации памятников деревянного зодчества, в том числе с объектами культурного наследия нижней Онеги. Соединение научных результатов с практическими мерами делает работу по сохранению архитектурного наследия наиболее эффективной.

Малые исторические города и поселения, имеющие слабо развитую промышленность и сельское хозяйство, обладают ресурсом для развития в виде объектов историко-культурного наследия [23]. Поэтому сохранение памятников архитектуры, прямо связанное с развитием сферы туризма, является едва ли не решающим фактором продолжения жизни малых исторических поселений в регионах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ходаковский Е.В.* Деревянная храмовая архитектура Русского Севера конца XVIII – начала XX века: основные задачи изучения и историко-художественной оценки // Архитектурное наследие. 2018. № 68. С. 109–122. EDN SAWDPV.

2. *Medvedeva M.* The Imperial Archaeological commission (1859–1918) and cultural heritage management in Russia // Architectural Conservation and Restoration in Norway and Russia. 2017. Pp. 38–55. DOI: 10.4324/9781315276205-4

3. *Ополовников А.В.* Русское деревянное зодчество. Памятники шатрового типа. Памятники клетского типа и малые архитектурные формы. Памятники ярусного, кубоватого и многоглавого типа. М.: Искусство, 1986.

4. *Орфинский В.П., Гришина И.Е.* Типология деревянного культового зодчества Русского Севера. Петрозаводск: Издательство ПГУ, 2004. 278 с. EDN QNKVFJ.

5. *Шургин И.Н.* Исчезающее наследие. Очерки о русских деревянных храмах XV–XVIII веков. М.: Совпадение, 2006.

6. *Ходаковский Е.В.* Деревянная церковная архитектура Русского Севера XIX – начала XX века: летопись храмостроительства. СПб.: Коло, 2020. 343 с.

7. *Ходаковский Е.В.* Деревянная церковная архитектура Русского Севера XIX – начала XX века: метаморфозы традиции. СПб.: Коло, 2021. 264 с.

8. *Noskova A., Khodakovsky E.* Archives and Historical Documents in Contemporary Research of the Wooden Architecture of the Russian North // Historic Wooden Architecture in Europe and Russia: Evidence, Study and Restoration. 2016. Pp. 78–91. EDN YYJTPF.

9. *Бодэ А.Б., Ходаковский Е.В.* Деревянное храмостроительство нижнего Поонежья XIX – начала XX века // Academia. Архитектура и строительство. 2020. № 2. С. 31–39. DOI: 10.22337/2077-9038-2020-2-31-39. EDN MWGLDK.

10. *Ходаковский Е.В.* «Под фасад каменного строения»: обшивка деревянных церквей Русского Севера в конце XVIII – начале XX в. // Academia. Архитектура и строительство. 2021. № 3. С. 25–33. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-3-25-33. EDN NBVJHP.

11. *Ходаковский Е.В., Зинина О.А.* Казанская церковь в деревне Большая Фёхтальма в Поонежье: материалы к творческой биографии архитектора А.А. Каретникова // *Архитектурное наследство*. 2020. № 72. С. 169–178.

12. *Бодэ А.Б., Жигальцова Т.В., Петрова С.В.* Церковь во имя святителя и чудотворца Николая в деревне Сырье // *Деревянное зодчество: Новые материалы и открытия*. 2022. № VIII. С. 266–278.

13. *Бодэ А.Б., Ковалевская Т.С.* Георгиевская церковь в деревне Большой Бор Онежского района Архангельской области // *Рябининские чтения 2023* : мат. IX конф. по изучению и актуализации традиционной культуры Русского Севера. 2023. С. 111–114. EDN XHJLJA.

14. *Ходаковский Е.В.* Деревянное храмовое зодчество Каргополья и Поонежья XVII–XVIII веков // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Искусствоведение*. 2024. Т. 14. № 3. С. 561–580. DOI: 10.21638/spbu15.2024.307. EDN IVKXTW.

15. *Khodakovskiy E.* Art and Power: The Northern Russian Eparchies in the Late-Seventeenth Century // *The Protracted Reformation in the North*. 2020. Pp. 107–136. DOI: 10.1515/9783110686210-006

16. *Khodakovskiy E.* Regional schools and traditions (14th – 19th centuries). London and New York : Routledge, 2016.

17. *Ковалевская Т.С.* Проявления традиции в архитектуре деревянных храмов Архангельской

губернии в XIX веке // *Деревянное зодчество. Новые материалы и открытия*. 2020. № VII. С. 214–215.

18. *Бодэ А.Б., Жигальцова Т.В.* Общерусские влияния в деревянном зодчестве Беломорья XVII–XVIII веков на примере Вознесенской церкви села Кушерека // *Academia. Архитектура и строительство*. 2021. № 4. С. 28–36.

19. *Ходаковский Е.В.* Древнерусские деревянные храмовые комплексы Русского Севера и их преобразования в XIX столетии // *Архитектурное наследство*. 2018. № 69. С. 51–62. EDN XOVG DY.

20. *Зинина О.А., Ходаковский Е.В., Носкова А.Г.* Деревянное храмовое зодчество Каргополья второй трети XIX века: Одигитриевская церковь в Малой Шалге и Георгиевская церковь в Замощье // *Архитектурное наследство*. 2019. № 70. С. 116–133. EDN BOYI OC.

21. *Бодэ А.Б.* Древние московские и новгородские корни в деревянном храмовом зодчестве Русского Севера. М. : Прогресс-традиция, 2019. 496 с. EDN UDQUWB.

22. *Khodakovskiy E.V., Lexau S.S.* The Northern neighbours and their heritage // *Architectural Conservation and Restoration in Norway and Russia*. 2017. Pp. 1–6. DOI: 10.4324/9781315276205-1

23. *Наццокина М.В.* Проблемы сохранения архитектурного наследия и создания туристической привлекательности малого исторического города России // *Проект Байкал*. 2019. Т. 16. № 61. С. 50–55. DOI: 10.7480/projectbaikal.61.1500. EDN BPLYXK.

Поступила в редакцию 19 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 11 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 12 декабря 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Андрей Борисович Бодэ — кандидат архитектуры, ведущий научный сотрудник; **Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства** — филиал Центрального научно-исследовательского и проектного института Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (НИИТИАГ — филиал ЦНИИП Минстроя России); 111024, г. Москва, ул. Душинская, д. 9; доцент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; директор; **Автономная некоммерческая организация «Исследование и реставрация памятников деревянного зодчества “Традиция”»**; 125008, г. Москва, Коптевский бул., д. 6; РИНЦ ID: 277025, Scopus: 57214857461, ResearchID: AFO-1810-2022, ORCID: 0000-0002-9866-845X; bode-niitag@yandex.ru;

Татьяна Валентиновна Жигальцова — научный сотрудник; **Автономная некоммерческая организация «Исследование и реставрация памятников деревянного зодчества “Традиция”»**; 125008, г. Москва, Коптевский бул., д. 6; кандидат философских наук, доцент; **Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова**; 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; РИНЦ ID: 552031, Scopus: 57217045158, ResearchID: ABD-2393-2021, ORCID: 0000-0002-5471-1540; zhitava@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Khodakovskiy E.V. Wooden church architecture of the Russian North of the late 18th – early 20th century: the main objectives of the study

and historical and artistic evaluation. *Architectural Heritage*. 2018; 68:109-122. EDN SAWDPV. (rus.).

2. Medvedeva M. The Imperial Archaeological commission (1859–1918) and cultural heritage management in Russia. *Architectural Conservation and Restoration in Norway and Russia*. 2017; 38-55. DOI: 10.4324/9781315276205-4
3. Opolovnikov A.V. *Russian Wooden Architecture. Tented Roof Monuments. Klet'-type Monuments and Hardscape Elements. Tiered, Square Onion Dome, and Multi-dome Monuments*. Moscow, Art, 1986. (rus.).
4. Orfinskiy V.P., Grishina I.E. *Typology of Wooden Cult Architecture of the Russian North*. Petrozavodsk, Publishing house of Petrozavodsk State University, 2004; 278. EDN QNKVFJ. (rus.).
5. Shurgin I.N. *Vanishing Heritage. Essays on Russian Wooden Churches XV–XVIII centuries*. Moscow, Sovpadenie, 2006. (rus.).
6. Khodakovskiy E. *Wooden Church Architecture of the Russian North XIX – early XX century. Chronicle of Temple Construction*. St. Petersburg, Kolo, 2020; 343. (rus.).
7. Khodakovskiy E. *Wooden Church Architecture of the Russian North XIX – early XX century. Metamorphoses of Tradition*. St. Petersburg, Kolo, 2021; 264. (rus.).
8. Noskova A., Khodakovskiy E. Archives and Historical Documents in Contemporary Research of the Wooden Architecture of the Russian North. *Historic Wooden Architecture in Europe and Russia: Evidence, Study and Restoration*. 2016; 78-91. EDN YYJTPF.
9. Bode A.B., Khodakovskiy E.V. Wooden temple construction of the lower Poonezhye of the XIX – early XX century. *Academy. Architecture and Construction*. 2020; 2:31-39. DOI: 10.22337/2077-9038-2020-2-31-39. EDN MWGLDK. (rus.).
10. Khodakovskiy E.V. Under the facade of a stone building: the cladding of wooden churches of the Russian north in the 19th century. *Academy. Architecture and Construction*. 2021; 3:25-33. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-3-25-33. EDN HBJXHP. (rus.).
11. Khodakovskiy E.V., Zinina O.A. Kazan Church in the village of Bolshaya Fekhtalma in Poonezhye : materials for the Creative Biography of the Architect A.A. Karetnikov. *Architectural Heritage*. 2020; 72:169-178. (rus.).
12. Bode A.B., Zhigaltsova T.V., Petrova S.V. Church in the Name of Saint and Miracle Worker Nicholas in the Village of Syrye. *Wooden Architecture. New Materials and Discoveries*. 2022; VIII:266-278. (rus.).
13. Bode A.B., Kovalevskaya T.S. St. George's Church in the Village of Bolshoy Bor, Onega District, Arkhangelsk Region. *Ryabiniin Readings 2023: Proceedings of Their Conference on the Study and Actualization of the Traditional Culture of the Russian North*. 2023; 111-114. EDN XHLJLA. (rus.).
14. Khodakovskiy E.V. Wooden church architecture of Kargopol and the river Onega areas in 17th – 18th centuries. *Vestnik of Saint Petersburg University. Arts*. 2024; 14(3):561-580. DOI: 10.21638/spbu15.2024.307. EDN IVKXTW. (rus.).
15. Khodakovskiy E. Art and Power: The Northern Russian Eparchies in the Late-Seventeenth Century. *The Protracted Reformation in the North*. 2020; 107-136. DOI: 10.1515/9783110686210-006
16. Khodakovskiy E.V. *Regional schools and traditions 14th – 19th centuries*. London and New York, Routledge, 2016.
17. Kovalevskaya T.S. Manifestations of Tradition in the Architecture of Wooden Churches of the Arkhangelsk Province in the 20th Century. *Wooden Architecture. New Materials and Discoveries*. 2020; VII:214-215. (rus.).
18. Bode A.B., Zhigaltsova T.V. All-Russian Influences in the Wooden Architecture of the White Sea of the 17th – 18th Centuries on the Example of the Church of the Ascension in the Village of Kushereka. *Academia. Academy. Architecture and Construction*. 2021; 4:28-36. (rus.).
19. Khodakovskiy E.V. Ancient early Russian wooden church complexes of the Russian north and their transformations in the 19th century. *Architectural Heritage*. 2018; 69:51-62. EDN XOVG DY. (rus.).
20. Zinina O.A., Khodakovskiy E.V., Noskova A.G. Kargopol wooden church architecture in the second third of the 19th century: church of St. George in Zamoshye and church of Hodegetria in Malaya Shalga. *Architectural Heritage*. 2019; 70:116-133. EDN BOYIOC. (rus.).
21. Bode A.B. *Ancient Moscow and Novgorod Roots in Wooden Temple Architecture of the Russian North*. Moscow, Progress-Traditsiia, 2019; 496. EDN UDQUWB. (rus.).
22. Khodakovskiy E.V., Lexau S.S. The Northern neighbours and their heritage. *Architectural Conservation and Restoration in Norway and Russia*. 2017; 1-6. DOI: 10.4324/9781315276205-1
23. Nashchokina M. The issues of preservation of architectural heritage and creation of tourist attraction of a small historic town in Russia. *Project Baikal*. 2019; 16(61):50-55. DOI: 10.7480/projectbaikal.61.1500. EDN BPLYXK. (rus.).

Received September 19, 2024.

Adopted in revised form on October 11, 2024.

Approved for publication on December 12, 2024.

BIONOTES: **Andrey B. Bode** — Candidate of Architecture, Leading Researcher; **Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Planning — a branch of the Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation (NIITIAG — a branch of TsNIIP of the Ministry of Construction of Russia)**; 9 Dushinskaya st., Moscow, 111024, Russian Federation; Associate Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Head; **Autonomous non-profit organization Research and restoration of monuments of wooden architecture “Tradition”**; 6 Koptevskiy boul., Moscow, 125008, Russian Federation; ID RSCI: 277025, ResearchID: AFO-1810-2022, Scopus: 57214857461, ORCID: 0000-0002-9866-845X; bode-niitag@yandex.ru;

Tatiana V. Zhigaltsova — researcher; **Autonomous non-profit organization Research and restoration of monuments of wooden architecture “Tradition”**; 6 Koptevskiy boul., Moscow, 125008, Russian Federation; Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor; **Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov**; 17 Severnaya Dvinaembankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; ID RSCI: 552031, Scopus: 57217045158, ResearchID: ABD-2393-2021, ORCID: 0000-0002-5471-1540; zhitava@gmail.com.

Contribution of the authors: all the authors contributed to this article equivalently.

The authors declare that there is no conflict of interests.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.012

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.506-515

Учет дефектов и повреждений железобетонных конструкций при выполнении поверочных расчетов

Анна Николаевна Малахова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Для определения категории технического состояния строительных конструкций и здания в целом строительные нормы предписывают выполнять оценку фактической несущей способности и эксплуатационной пригодности конструкций на основе поверочных расчетов, в которых должны быть учтены выявленные по результатам обследования технического состояния объекта повреждения и дефекты конструкций: изменение геометрических размеров поперечного сечения конструкций, фактические прочностные характеристики материалов железобетонных конструкций (ЖБК) и их армирование, действующие нагрузки, а также уточненные расчетные схемы, созданные с учетом обнаруженных повреждений и дефектов конструкций. Дефекты и повреждения несущих конструкций моделируются в информационной расчетной модели объекта, созданной на этапе его проектирования.

Материалы и методы. Приводятся примеры моделирования в программном комплексе ЛИРА дефектов, связанных с нарушениями технологии возведения объектов, последовательность построения плоской расчетной модели как фрагмента информационной расчетной модели объекта для начальной оценки влияния дефектов и повреждений на напряженно-деформированное состояние обследуемой конструкции.

Результаты. Представленный обзор литературы показал наличие частных методик компьютерного моделирования дефектов и повреждений ЖБК, но при этом выявил неполноту нормативных рекомендаций по компьютерному моделированию дефектов и повреждений. Подчеркивается, что для оценки обнаруженных дефектов и повреждений, отнесения конструкций с дефектами и повреждениями к категориям технического состояния, особенно к категории аварийное состояние, важным моментом является классификация этих дефектов и повреждений.

Выводы. Сделан вывод, что, хотя такая классификация имеет место в последней актуализированной версии ГОСТ 31937–2024, она также нуждается в дополнении и уточнении. На примерах продемонстрировано, что на первоначальном этапе поверочных расчетов достаточно воспользоваться небольшими плоскими моделями, результаты расчета которых следует учесть при корректировке информационной расчетной модели обследуемого объекта. Это существенно упростит подход к моделированию конструкций с дефектами и повреждениями с сохранением достаточной точности результатов оценки технического состояния конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обследование технического состояния зданий, дефекты и повреждения железобетонных конструкций, поверочные расчеты, компьютерное моделирование дефектов и повреждений, категория технического состояния

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Малахова А.Н. Учет дефектов и повреждений железобетонных конструкций при выполнении поверочных расчетов // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 4. С. 506–515. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.506-515

Автор, ответственный за переписку: Анна Николаевна Малахова, MalahovaAN@mgsu.ru, malahov@gnext.ru.

Consideration of defects and damages of reinforced concrete structures in verification calculations

Anna N. Malahova

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

ABSTRACT

Introduction. To determine the category of technical condition of building structures and the building as a whole, building codes require the assessment of the actual load-bearing capacity and serviceability of structures based on verification calculations, which must take into account the damage and defects of structures identified during the inspection of the technical

condition of the object: changes in the geometric dimensions of the cross-section of structures, actual strength characteristics of reinforced concrete structure materials and their reinforcement, acting loads, as well as refined calculation schemes created taking into account the identified damage and defects of structures. Defects and damage to load-bearing structures are modelled in the information calculation model of the object created at the design stage of the object.

Materials and methods. The paper provides examples of modelling in the LIRA software of defects associated with violations of the technology of construction of objects, the sequence of construction of a flat calculation model as a fragment of the information calculation model of the object, created for the initial assessment of the influence of defects and damages on the stress-strain state of the surveyed structure.

Results. The literature review presented in the paper showed the existence of private methods of computer modelling of defects and damages of reinforced concrete structures, but at the same time revealed the incompleteness of regulatory recommendations for computer modelling of defects and damages. The paper emphasizes that for the assessment of the detected defects and damages, as well as for classifying structures with defects and damages into categories of technical condition, especially into the category of emergency condition, an important point is the availability of a classification of these defects and damages.

Conclusions. It was concluded that although such a classification exists in the latest updated version of GOST 31937–2024, it also requires significant additions and clarifications. The examples show that at the initial stage of verification calculations it is sufficient to use small flat models, the calculation results of which should be taken into account when correcting the information calculation model of the surveyed object. This will significantly simplify the approach to modelling structures with defects and damages while maintaining sufficient accuracy of the results of assessing the technical condition of structures.

KEYWORDS: inspection of the technical condition of buildings, defects and damage to reinforced concrete structures, verification calculations, computer modelling of defects and damages, technical condition category

FOR CITATION: Malahova A.N. Consideration of defects and damages of reinforced concrete structures in verification calculations. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(4):506-515. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.506-515 (rus.).

Corresponding author: Anna N. Malahova, MalahovaAN@mgsu.ru, malahov@gnext.ru.

ВВЕДЕНИЕ

При обследовании технического состояния зданий и сооружений выявляются дефекты и повреждения несущих конструктивных элементов, в частности железобетонных конструкций (ЖБК). По результатам поверочных расчетов в рамках проводимых обследований технического состояния определяется категория технического состояния как отдельных несущих элементов, так и здания или сооружения в целом по классификации ГОСТ 31937–2024 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния»: нормативное, работоспособное, ограниченно работоспособное и аварийное состояние.

При выполнении поверочных расчетов должны быть учтены выявленные дефекты и повреждения несущих элементов конструктивной системы объекта, которые могут привести к нарушению несущей способности и эксплуатационной пригодности несущих конструкций, а также обследуемого объекта в целом.

В ГОСТ 31937–2024 (приложение Е) перечислены виды дефектов и повреждений ЖБК, указаны причины их появления, а также возможность достижения несущими конструкциями с выявленными дефектами и повреждениями ограниченно работоспособного или аварийного состояния.

Авторы статьи [1] подчеркивают необходимость включения в нормативные документы по обследованию технического состояния зданий и сооружений расширенного списка дефектов и повреждений строительных конструкций с четкой количественной оценкой их влияния на несущую способность и эксплуатационную пригодность конструкций для возможности их обоснованного отнесения к соот-

ветствующей категории технического состояния. И, прежде всего, к аварийной категории технического состояния, отнесение к которой приводит к серьезным последствиям, в том числе к сносу аварийного объекта.

Между тем статически неопределимые ЖБК способны к перераспределению усилий и, соответственно, к совместной работе различных зон конструкции как единого целого. В работе [2] представлен расчетный аппарат, позволяющий учесть совместную работу зон по длине балки с ослабленной коррозией арматурой и без коррозионных повреждений.

Предлагается [3] ввести в строительные нормы дифференцированный подход к выбору методов усиления несущих конструкций зданий и сооружений в зависимости от наличия или отсутствия дефектов и повреждений, влияющих на напряженно-деформированное состояние (НДС) усиливаемых конструкций.

В последние годы обследование технического состояния объектов строительства характеризуется широким использованием современной инструментальной базы и, соответственно, значительным объемом выявленных дефектов и повреждений [4–7]. Отмечается [5] выявление с помощью метода импеданса множественных сдвиговых и изгибных трещин, возникших в железобетонной балке при испытании на изгиб. В труде [7] указывается, что низкое качество строительных материалов является наиболее распространенным фактором, который приводит к дефектам и повреждениям строительных конструкций.

Возрастает количество обследований зданий старой постройки, конструктивные решения ко-

торых давно не используются, а здания неоднократно перестраивались. При этом выявляется значительное количество специфических дефектов и повреждений [8, 9], которые целесообразно добавить в действующие строительные нормы. Так, авторы публикации [9] отмечают, что обследования технического состояния зданий старой постройки, особенно уникальных, проводятся редко, а накопленные за время эксплуатации зданий дефекты ЖБК могут существенно влиять на их несущую способность и присвоение категории технического состояния этим несущим элементам и всему зданию в целом.

Некоторые дефекты и повреждения несущих конструкций зданий и сооружений могут иметь место на этапе возведения зданий и сооружений [10, 11]. Так, для строительных объектов в сборном железобетоне они связаны с качеством монтажа конструкций, которое регламентируется требованиями СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции». В монолитных зданиях и сооружениях появление прогибов несущих элементов перекрытий, отклонение колонн и стен от вертикали может быть следствием ошибок в подборе опалубки и ее установке. Актуально [11] исследование влияния повреждений изгибаемых железобетонных элементов, полученных под действием нагружения. При этом важным моментом служит моделирование повреждений, которые оказывают воздействие на несущую способность и эксплуатационную пригодность строительных конструкций. Авторы считают, что необходима дальнейшая разработка методов исследования железобетонных элементов с типовыми повреждениями, что даст возможность точнее моделировать реальные повреждения, изучать НДС таких конструкций. Особенно это касается изучения повреждений сжатой зоны бетона, что является типовым дефектом, представляющим существенный риск для дальнейшей безопасной эксплуатации конструкций, а также исследования повреждений и дефектов, полученных под воздействием нагрузок различной интенсивности.

Авторы работ [5, 12–15] показывают важность выполнения геодезических и других измерений, выполняемых в ходе мониторинга, которые позволяют оценить отклонения геометрических параметров несущих элементов зданий и сооружений, изменения их прочностных характеристик, вызванных разными причинами, в том числе технологическими ошибками, допущенными при возведении строительного объекта. Рассматривается [12–14] построение пространственно-координатной модели здания или сооружения. С помощью координатной съемки определенных точек и узлов фиксируется пространственное расположение конструктивных элементов обследуемого здания. При этом для расчетной модели проверяются и при необходимости корректируются координаты точек и узлов соот-

ветствующих элементов расчетной модели. Хотя построение пространственно-координатной модели имеет место в основном при мониторинге уникальных зданий, геодезические измерения для оценки отклонения геометрических параметров несущих элементов зданий и сооружений от проектного положения в настоящее время все чаще включают в программу обследования технического состояния объектов массового строительства.

Для предотвращения технологических дефектов, которые могут появиться в построечный период, требуется проведение прочностных и деформационных расчетов на стадии возведения монолитных конструкций. Осуществлен подбор профилированного настила [16] исходя из ограничения допустимых прогибов, фиксируемых при возведении и эксплуатации сталежелезобетонных плит перекрытия здания.

Представлены результаты использования метода на основе импеданса для обнаружения дефектов и повреждений ЖБК в ходе мониторинга их технического состояния [5]. Утверждается, что результаты аналитических расчетов подтвердили обоснованность экспериментальных результатов, предоставив ценный инструмент для исследования практического применения метода импеданса. В публикации [15] показана важность проведения строительного контроля застройщика, в том числе лабораторного контроля строительных материалов и конструкций, для обеспечения качественных эксплуатационных характеристик всего объекта.

Авторы многих научных статей [17–20] сходятся во мнении, что только стремление к более полному выявлению дефектов и повреждений несущих конструкций зданий и сооружений, их учет при выполнении поверочных расчетов позволят правильно определять категорию технического состояния строительных конструкций и строительного объекта в целом по результатам обследования технического состояния, хотя учет большого количества дефектов и повреждений увеличивает трудоемкость расчетов, требует подбора средств программных комплексов (ПК) для описания дефектов и повреждений в расчетной модели объекта. Приводятся результаты исследования повреждений ЖБК, работающих в агрессивной среде, опыт разработки специальных технических регламентов, определяющих условия и порядок проведения исследований и диагностики ЖБК [20].

Следует отметить, что сегодня не сложились общие подходы к моделированию дефектов в расчетной модели объекта и практически отсутствуют общепринятые методики компьютерного учета дефектов и повреждений. Сложность заключается в том, что применяемые в настоящее время для строительного проектирования ПК имеют разный набор средств для описания дефектов и повреждений в расчетной модели объекта.

Указанное выше вызывает определенные затруднения при оценке влияния выявленных дефектов и повреждений на несущую способность и эксплуатационную пригодность конструкций, при уточнении расчетных схем с учетом дефектов и повреждений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматриваются возможности ПК ЛИРА [21] для корректировки информационной расчетной модели объекта с учетом выявленных в результате его обследования дефектов и повреждений. По требованию нормативных документов, в частности СП 430.1325800 «Монолитные конструктивные системы», СП 355.1325800 «Крупнопанельные конструктивные системы», расчет конструктивных систем здания следует осуществлять путем построения пространственных расчетных моделей объекта совместно с основанием и расчеты вести в нелинейной постановке.

Внесение изменений прочностных и деформационных характеристик материалов, корректировка размеров поперечного сечения несущих конструкций, толщины защитного слоя бетона, расположения арматурных стержней, параметров армирования выполняется в диалоговых окнах команды *жесткости и материалы* и в программном модуле *локальное армирование* ПК ЛИРА.

Для расчетных задач в нелинейной постановке (команда *жесткости и материалы*) при наличии ослабленных зон бетона требуется замена для этих зон закона деформирования бетона, который первоначально назначается по проектному классу бетона, закона деформирования материала обследуемых зон, в том числе бетона с трещинами и повреждениями. Изменение содержания рабочей арматуры может быть произведено в диалоговом окне *арматурные включения*. В статье [22] приведено описание расчета монолитной плиты перекрытия в нелинейной постановке.

Коррозионные повреждения довольно сложно учесть при корректировке расчетных схем, так как балки и колонны моделируются стержнями, а стены и плиты — пластинами.

Для компьютерного моделирования эксперимента, например с железобетонной балкой, ее пространственная расчетная схема строится из объемных конечных элементов (КЭ), арматура моделируется стержнями, которые могут быть с коррозионными повреждениями как по периметру, так и по их длине с нарушением сцепления арматуры с бетоном. При этом для различных зон бетона балки задаются разные законы деформирования материала, доступен также учет ортотропии.

По ГОСТ 31937–2024 (приложение Е) внешними признаками коррозии арматуры являются трещины вдоль арматурных стержней и отслоение защитного слоя бетона. При расположении коррози-

онных дефектов на опорных участках конструкции ее техническое состояние должно быть отнесено к аварийному.

Частные методики по оценке влияния коррозионных повреждений на несущую способность и эксплуатационную пригодность балки или колонны, созданию расчетных моделей поврежденных конструкций в ПК ЛИРА и ANSYS приведены в публикациях [23, 24]. Общепринятые методики отсутствуют.

Следует отметить, что в ПК ANSYS и ABAQUS предусмотрены КЭ, позволяющие выключать из работы зоны тех конструктивных элементов, где растягивающие усилия превышают прочность бетона на растяжение [13, 25].

В ПК ЛИРА о появлении трещин, например в плите перекрытия, также можно судить по превышению возникающих напряжений над прочностью бетона при растяжении. Система ЛИТЕРА ПК ЛИРА (*расширенный анализ* ⇒ *расчет ЛИТЕРА*) дает возможность по графическому представлению направления главных напряжений и величине этих напряжений судить о расположении линий излома конструкции и о развитии трещин по линиям излома.

Трещины, возникающие в конструкции по линиям излома, — это трещины разрушения. Они отличаются от волосяных трещин, не имеющих четкой ориентации и прогнозируемого расположения, которые служат следствием проявления усадочных деформаций и не влияют на несущую способность конструкций [26, 27].

Кроме расчета в системе ЛИТЕРА в ПК ЛИРА предусмотрен расчет трещин (*расширенный анализ* ⇒ *расчет трещин*), который позволяет для задач в нелинейной постановке количественно определять параметры трещин (глубину, ширину и расстояние между трещинами) и наблюдать анимацию развития трещин для заданных ступеней приложения нагрузки, и, если это предусмотрено заданием нагружения, то вплоть до разрушения конструкции. В статье [27] приведено описание компьютерного расчета трещин в монолитной плите перекрытия в ПК ЛИРА.

Возведение монолитных зданий и сооружений требует устройства технологических швов бетонирования, в которых при проведении обследования технического состояния конструкций могут выявляться дефекты и повреждения. В исследованиях последних лет уделяется внимание вопросам обследования технического состояния технологических швов бетонирования, их моделирования при корректировке расчетной схемы зданий и сооружений, оценке влияния швов бетонирования на НДС конструкций.

Рассматриваются особенности моделирования технологических швов бетонирования в расчетной схеме зданий по результатам обследования технического состояния конструктивных элементов с учетом фактических мест расположения техноло-

гических швов бетонирования, а также ослабление прочностных и деформационных свойств бетона в зонах швов бетонирования [28, 29].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В статье приведены приемы и последовательность моделирования в ПК ЛИРА дефектов, связанных с нарушениями технологии возведения плоского перекрытия монолитного здания стеновой конструктивной системы и стены монолитного прямоугольного заглубленного резервуара, предназначенного для аккумуляции и очистки воды сети ливневого водоотведения, с оценкой влияния выявленных дефектов на прочностные и эксплуатационные характеристики обследуемых конструкций и установлением категории их технического состояния.

При выполнении поверочных расчетов в рамках обследования технического состояния объектов перед корректировкой информационной расчетной модели, созданной на этапе проектирования, рекомендуется сначала рассмотреть влияние выявленных дефектов на плоской расчетной модели. На такой модели можно отработать методику и средства моделирования конкретных дефектов и повреждений и оценить их влияние на НДС сначала на фрагменте конструкции. При выделении плоской модели из пространственной модели объекта необходимо обоснованно закреплять опорные узлы плоской расчетной модели.

В статье рассматриваются примеры моделирования и расчета плоских фрагментов информационной расчетной модели объекта.

Прогиб плиты плоского монолитного перекрытия, жестко сопряженной со стенами по трем

сторонам, вызванный нарушениями технологии ее возведения, имел место в пределах одной ячейки с максимальным значением прогиба 6 см у свободного края плиты. Проведение геодезической съемки в рамках обследования технического состояния объекта было ориентировано на разбивочную сетку плиты в информационной расчетной схеме, созданной на этапе проектирования здания.

Корректировка плоской расчетной схемы ячейки плиты заключается в придании перекрытию установленного дополнительного прогиба, для чего необходимо скорректировать геометрию пластинчатого элемента, опустив узлы по вертикали (команда *перемещение*).

Смещение узлов разбивочной сетки по вертикали в общем случае выполняется для треугольных пластинчатых элементов, поэтому при необходимости требуется корректировка расчетной схемы с использованием команды *преобразование пластинчатых КЭ* (рис. 1, *a*). То есть в корректируемой зоне плиты 4-узловые конечные элементы должны быть заменены на 3-узловые КЭ.

На рис. 1, *b* показана плита перекрытия после моделирования в ее расчетной схеме предварительного технологического прогиба, а также изополя напряжений и изополя прогибов и напряжений, полученные в результате статического расчета при проектном нагружении с учетом наличия значительного начального прогиба. Величина прогиба и возникающие напряжения для плиты с дополнительным начальным прогибом и без него при проектном нагружении практически одинаковы, но суммарное значение прогиба плиты с начальным прогибом технологического характера превышает предельно допустимые значения.

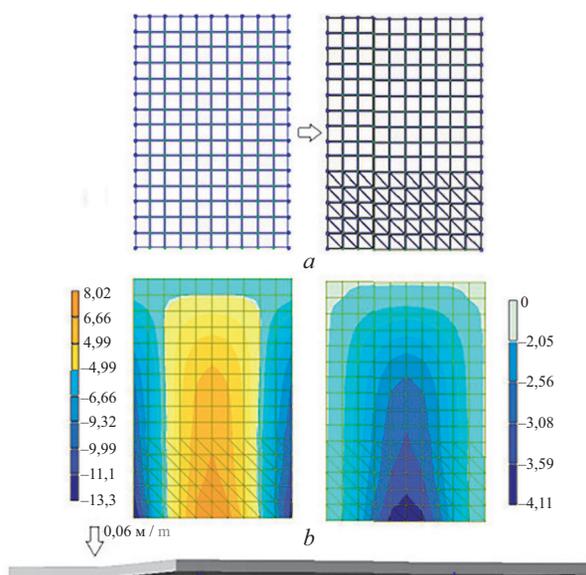


Рис. 1. Плоская плита перекрытия 5×7,5 м после корректировки геометрии (а) и изополя напряжений – изгибающих моментов по M_x в кНм/м и прогибов в мм (б), полученные в результате статического расчета

Fig. 1. Flat floor slab 5×7.5 m after geometry correction (a) and stress isofield – bending moments according to M_x in kNm/m and deflections in mm (b), obtained as a result of static calculation

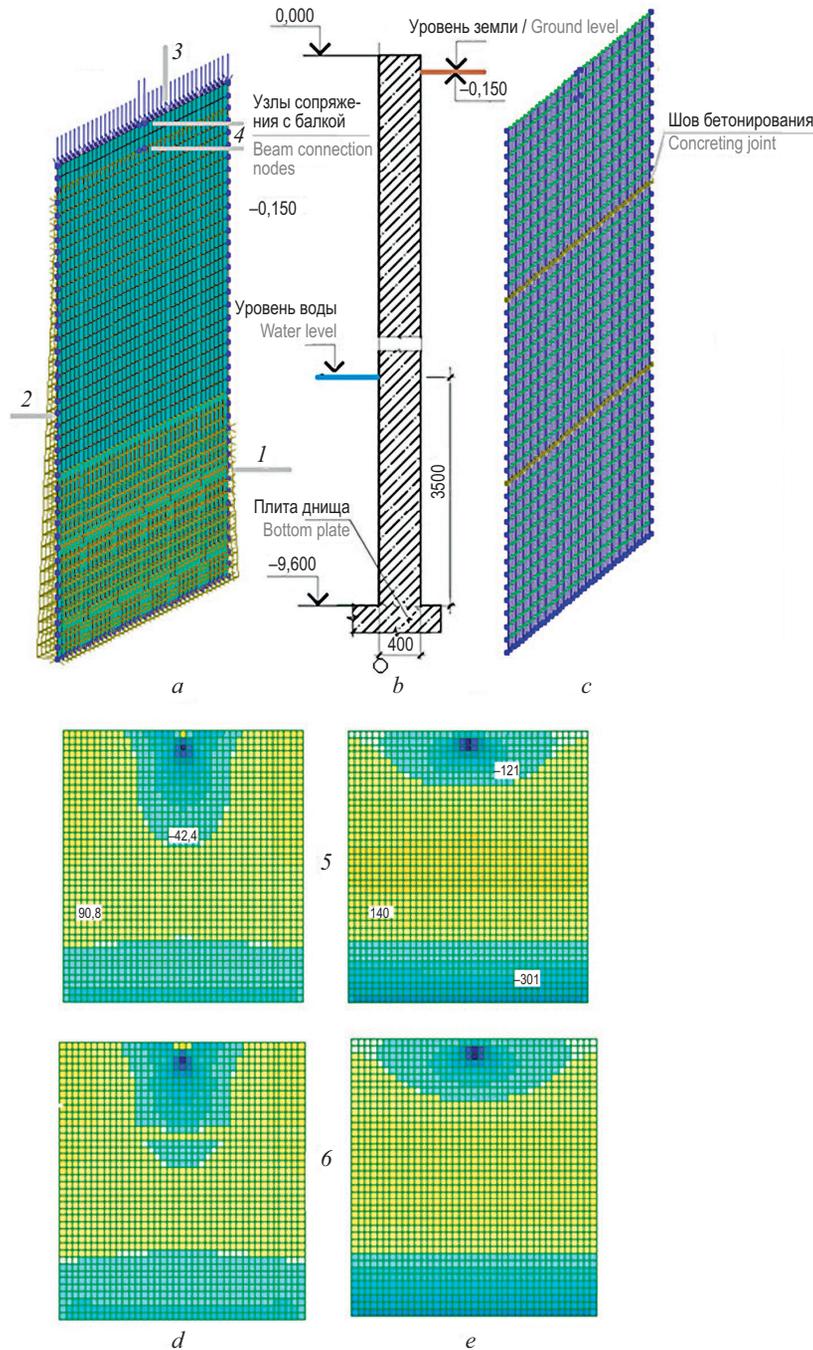


Рис. 2. Расчет фрагмента продольной стены резервуара: *a* — плоская расчетная схема фрагмента; *1* — гидростатическая нагрузка; *2* — боковое давление грунта; *3* — нагрузка от веса покрытия и снега; *4* — узлы примыкания балки покрытия к стене; *b* — общий вид стены в разрезе; *c* — моделирование технологических швов бетонирования (ослабленная зона высотой 500 мм); *d, e* — изополя напряжений, соответственно, по M_y и M_x ; *5* — распределение напряжений при отсутствии швов бетонирования; *6* — распределение напряжений при наличии швов бетонирования

Fig. 2. Calculation of a fragment of the longitudinal wall of the reservoir: *a* — a flat calculation scheme of the fragment; *1* — hydrostatic load; *2* — lateral soil pressure; *3* — load from the weight of the roof and snow; *4* — nodes of the junction of the roof beam to the wall; *b* — general view of the wall in section; *c* — modelling of technological concreting joints (weakened zone 500 mm high); *d, e* — stress isofields, respectively, along M_y and along M_x ; *5* — stress distribution in the absence of concreting joints; *6* — stress distribution in the presence of concreting joints

В этом случае для определения категории технического состояния можно воспользоваться рекомендациями ГОСТ 31937–2024 (приложение Е), по которым степень опасности чрезмерного прогиба определяется в зависимости от наличия других

дефектов, прежде всего трещин по линиям излома с недопустимой шириной раскрытия, что в обследуемой плите не наблюдается.

Второй пример нарушения технологии возведения объекта относится к выполнению горизонталь-

ных швов бетонирования в стенах прямоугольного заглубленного резервуара. Монолитный резервуар имеет размеры в плане $34,3 \times 20,9$ м и высоту 9,6 м. По высоте в стенах резервуара предусмотрено два шва бетонирования.

Поверочные расчеты пространственной модели резервуара без учета швов бетонирования показали достаточную несущую способность стен резервуара. При этом максимальные изгибающие моменты имели место в продольных наружных стенах резервуара.

Начальная оценка влияния швов бетонирования на НДС стен резервуара может быть выполнена на фрагменте продольной (длинной) стены резервуара. Плоская расчетная схема фрагмента стены представлена на рис. 2, а. Для этой расчетной схемы применимы две плоскости прямой симметрии YOZ . На боковые узлы фрагмента, лежащие в плоскости симметрии, накладываются связи X , UY , UZ . Нижние узлы расчетной схемы и узлы сопряжения полок двутавровой балки покрытия резервуара со стеной имеют жесткое закрепление.

Нагружение расчетной схемы фрагмента стены резервуара включает давление грунта, гидростатическое давление (уровни грунта и воды показаны на рис. 2, б), а также нагружение, передаваемое от покрытия резервуара на стену.

На рис. 2, с приводится расположение швов бетонирования. В работе [30] показано, что при укладке свежей бетонной смеси на затвердевший бетон предыдущего участка бетонирования в любом случае образуется зона с пониженными прочностными характеристиками. Определение прочности бетона в зоне расположения стыков подтверждает эти утверждения [31]. При этом эксплуатационная пригодность стен резервуара с учетом ширины раскрытия трещин будет связана с фильтрацией воды, которая усиливается при наличии дефектных швов бетонирования. Для учета снижения прочности бетона в зоне расположения швов бетонирования в плоской расчетной модели были уменьшены прочностные характеристики материала в зоне стыка высотой 500 мм.

На рис. 2, д, е показаны результаты расчета фрагмента стены со швами и без швов бетонирования. В обоих расчетах несущая способность стены была обеспечена.

Анализ результатов расчетов плоских моделей с дефектами и повреждениями следует учитывать при корректировке информационных расчетных моделей объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При обследовании технического состояния железобетонных зданий и сооружений с привлечением организаций, имеющих развитую приборную базу, выявляется значительное количество дефектов и повреждений, которые необходимо учесть при выполнении поверочных расчетов. Приведенный обзор литературы показывает наличие частных методик компьютерного моделирования дефектов и повреждений железобетонных конструкций, но при этом отсутствуют нормативные рекомендации по компьютерному моделированию дефектов и повреждений.

Важным моментом в оценке выявленных дефектов и повреждений является их классификация по отнесению конструкций с дефектами и повреждениями к категориям технического состояния, особенно к категории аварийное состояние. Такая классификация дефектов и повреждений имеет место в последней актуализированной редакции ГОСТ 31937–2024, но она также нуждается в дополнении и уточнении.

В статье на примерах предлагается до проведения поверочного расчета и корректировки пространственной информационной расчетной модели объекта построить плоский фрагмент расчетной модели и на нем, осуществив подбор и применение средств моделирования дефектов и повреждений, оценить их влияние на НДС несущих элементов зданий и сооружений. Анализ результатов расчета плоской модели необходимо учесть при корректировке информационной расчетной модели объекта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Липидус А.А., Топчий Д.В., Юргайтис А.Ю., Климина В.В. Формирование унифицированной классификации дефектов при строительстве промышленных объектов // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 11–1. С. 37–42. DOI: 10.17513/snt.38335. EDN MCLADW.
2. Тамразян А.Г. Перераспределения усилий в статически неопределимых корродированных железобетонных балках // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 8. № 4. С. 5–13. DOI: 10.22227/2949-1622.2024.4.5-13. EDN BGHEDF.
3. Бенин Д.М., Снежко В.Л., Маркова Е.С. Анализ напряженно-деформированного состояния усиливаемых железобетонных конструкций // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 28. С. 895–902. EDN JJDQOS.
4. Кутнякова В.В., Морозова Н.Е., Весовая К.Ю., Воробьева М.А. Определение технического состояния строительных конструкций для реконструкции здания поликлиники // Вестник евразийской науки. 2019. Т. 11. № 5. С. 53. EDN ITQADL.
5. Park S., Ahmad S., Yun C.B., Roh Y. Multiple crack detection of concrete structures using impedance-

- based structural health monitoring techniques // *Experimental Mechanics*. 2006. Vol. 46. Issue 5. Pp. 609–618. DOI: 10.1007/s11340-006-8734-0
6. *Panasyuk V.V., Marukha V.I., Sylovanyuk V.P.* Predominant Damages and Injuries in Reinforced Concrete Structures Arising During Use // *Injection Technologies for the Repair of Damaged Concrete Structures*. 2014. Pp. 35–65. DOI: 10.1007/978-94-007-7908-2_3
7. *Ahzahar N., Karim N.A., Hassan S.H., Eman J.* A Study of Contribution Factors to Building Failures and Defects in Construction Industry // *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 20. Pp. 249–255. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.162
8. *Полищук А.И., Петухов А.А., Таюкин Г.И.* Реконструкция здания генетической клиники НИИ медицинской генетики Томского научного центра СО РАМН // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. 2015. № 1. С. 166–184. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.1.12. EDN TYFVMN.
9. *Okolnikova G.E., Ershov M.E., Malafeev A.S.* The effect of defects and damages in reinforced concrete load-bearing structures on further operating conditions // *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*. 2024. Vol. 19. Issue 7. DOI: 10.26782/jmcms.2024.07.00001
10. *Пешнина И.В., Пешнин А.Н., Гаврилова Е.О.* Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонного сборного каркаса с дефектами и повреждениями // *Символ науки: международный научный журнал*. 2021. № 2. С. 17–23. EDN PXGGLR.
11. *Lobodanov M., Vegera P., Blikharsky Z.* Influence analysis of the main types of defects and damages on bearing capacity in reinforced concrete elements and their research methods // *Production Engineering Archives*. 2019. Vol. 22. Issue 22. Pp. 24–29. DOI: 10.30657/pea.2019.22.05
12. *Коргин А.В., Ранов И.И., Коргина М.А., Поляков Д.А.* Мониторинг изменения напряженно-деформированного состояния строительных конструкций зданий и сооружений на основе МКЭ-анализа пространственно-координатных моделей // *Вестник МГСУ*. 2007. № 4. С. 83–87. EDN MVHAER.
13. *Ермаков В.А., Коргин А.В.* Методика МКЭ-оценки несущей способности конструкций с учетом наличия дефектов // *Вестник МГСУ*. 2009. № 1. С. 26–28.
14. *Коргин А.В., Ермаков В.А.* Автоматизация формирования и коррекции расчетных моделей при мониторинге технического состояния зданий и сооружений // *Интернет-вестник ВолгГАСУ*. 2012. № 3 (23). С. 35. EDN PWPJLR.
15. *Lapidus A.A., Makarov A.N.* Risk-Based Approach for the organization of construction supervision of the developer // *AIP Conference Proceedings*. 2022. Vol. 2559. P. 060003. DOI: 10.1063/5.0099138
16. *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.
17. *Сергеева А.Ю., Мясущев Р.Ю., Сергеев Ю.Д.* Выявление причин образования дефектов в строительных конструкциях // *Актуальные проблемы строительства, природообустройства, кадастра и землепользования* : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. 2022. С. 59–63. EDN WCIAU.
18. *Зарембо Р.А., Зарембо И.А.* Влияние характерных повреждений и дефектов на долговечность железобетонных и бетонных строительных конструкций // *Научные исследования в современном мире: опыт, проблемы и перспективы развития* : сб. науч. ст. по мат. III Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 270–277. EDN XYMZRQ.
19. *Гусев Н.Н., Кучеренко А.О.* Учет сформированного напряженно-деформированного состояния несущих конструкций при проведении поверочных расчетов их несущей способности // *Современные направления в строительстве и эксплуатации зданий и сооружений* : сб. науч. тр. 2019. С. 6–14. EDN PPTKGY.
20. *Pepeñar I.* Damage evaluation of reinforced concrete structures in aggressive environments // *7th International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering*. 2009. Vol. 14 (7).
21. *Городецкий А.С., Евзеров И.Д.* Компьютерные модели конструкций. М. : Издательство АСВ, 2009. 360 с.
22. *Малахова А.Н.* Расчет плоских плит перекрытий монолитного каркасного здания с учетом нелинейной работы материалов // *Системные технологии*. 2022. № 2 (43). С. 41–47. DOI: 10.55287/22275398_2022_2_41. EDN BUUJYO.
23. *Смоляго Г.А., Фролов Н.В.* Моделирование коррозионно-поврежденных железобетонных балок в ПК ЛИРА-САПР // *Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения* : мат. Междунар. академических чтений. 2020. С. 266–271. EDN ZZNVDM.
24. *Тамразян А.Г., Алексейцев А.В., Попов Д.С., Курченко Н.С.* Несущая способность коррозионно-поврежденных сжатых железобетонных элементов при поперечном нагружении // *Промышленное и гражданское строительство*. 2023. № 9. С. 5–11. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.09.05-11. EDN BMPSSJ.
25. *Коргин А.В., Зейд К.Л.З., Ермаков А.А.* Учет трещиноподобных дефектов при мониторинге строительных конструкций // *Вестник МГСУ*. 2013. № 12. С. 77–83.
26. *Малахова А.Н.* Особенности работы монолитного балочного перекрытия под нагрузкой // *Вестник МГСУ*. 2013. № 11. С. 50–57. EDN ROWKDD.

27. Malakhova A. Estimation of cracking of reinforced concrete load-bearing construction structures at the stage of their technical inspection // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 02040. DOI: 10.1051/mateconf/201825102040

28. Коянкин А.А., Белецкая В.И., Гужевская А.И. Влияние шва бетонирования на работу конструкции // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 76–81. EDN RYXTND.

29. Дейнеко А.В., Курочкина В.А., Яковлева И.Ю., Старостин А.Н. Проектирование железобетонных перекрытий с учетом рабочих швов бето-

нирования // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 9 (132). С. 1106–1120. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.9.1106-1120. EDN AOFARH.

30. Писарев С.В., Астахов Н.Н. Оценка технического состояния конструкций зданий при типовых нарушениях технологии строительства // Приоритетные научные направления: от теории к практике. 2014. № 12. С. 142–148. EDN SGYHOZ.

31. Малахова А.Н. Возможные комплексные причины появления трещин в стенах подземного резервуара // Строительство и реконструкция. 2018. № 1 (75). С. 67–71. EDN XNZASL.

Поступила в редакцию 12 ноября 2024 г.

Принята в доработанном виде 30 декабря 2024 г.

Одобрена для публикации 21 февраля 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **Анна Николаевна Малахова** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0003-0203-0193; MalahovaAN@mgsu.ru, malahov@gnext.ru.

REFERENCES

1. Lapidus A.A., Topchiy D.V., Yurgaitis A.Y., Klimina V.V. Formation of a unified classification of defects in the construction of industrial objects. *Modern High Technologies*. 2020; 11-1:37-42. DOI: 10.17513/snt.38335. EDN MCLADW. (rus.).

2. Tamrazyan A.G. Stress Redistribution in Statically Indeterminate Corroded Reinforced Concrete Beams. *Reinforced Concrete Structures*. 2024; 8(4):5-13. DOI: 10.22227/2949-1622.2024.4.5-13. EDN BGHEDF. (rus.).

3. Benin D.M., Snezhko V.L., Markova E.S. Analysis of the stress-strain state of reinforced concrete structures. *Innovations. The science. Education*. 2021; 28:895-902. EDN JJDQOS. (rus.).

4. Kutniakova V.V., Morozova N.E., Vesovaya K.Yu., Vorobeva M.A. Determination of the technical condition of building structures for the reconstruction of the polyclinic building. *The Eurasian Scientific Journal*. 2019; 11(5):53. EDN ITQADL. (rus.).

5. Park S., Ahmad S., Yun C.B., Roh Y. Multiple crack detection of concrete structures using impedance-based structural health monitoring techniques. *Experimental Mechanics*. 2006; 46(5):609-618. DOI: 10.1007/s11340-006-8734-0

6. Panasyuk V.V., Marukha V.I., Sylovanyuk V.P. Predominant Damages and Injuries in Reinforced Concrete Structures Arising During Use. *Injection Technologies for the Repair of Damaged Concrete Structures*. 2014; 35-65. DOI: 10.1007/978-94-007-7908-2_3

7. Ahzahar N., Karim N.A., Hassan S.H., Eman J. A Study of Contribution Factors to Building Failures and Defects in Construction Industry. *Procedia Engineering*. 2011; 20:249-255. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.162

8. Polishchuk A.I., Petukhov A.A., Taiukin G.I. Reconstruction the genetics clinic building of sri of medical genetics of Tomsk scientific center of rams Siberian branch. *Construction and Geotechnics*. 2015; 1:166-184. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.1.12. EDN TYFVMN. (rus.).

9. Okolnikova G.E., Ershov M.E., Malafeev A.S. The effect of defects and damages in reinforced concrete load-bearing structures on further operating conditions. *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*. 2024; 19(7). DOI: 10.26782/jm-cms.2024.07.00001

10. Peshnina I.V., Peshnin A.N., Gavrilova E.O. Study of the stress-strain state of a reinforced concrete prefabricated frame with defects and damage. *Symbol of Science: International Scientific Journal*. 2021; 2:17-23. EDN PXGGLR. (rus.).

11. Lobodanov M., Vegera P., Blikharsky Z. Influence analysis of the main types of defects and damages on bearing capacity in reinforced concrete elements and their research methods. *Production Engineering Archives*. 2019; 22(22):24-29. DOI: 10.30657/pea.2019.22.05

12. Korgin A.V., Ranov I.I., Korgina M.A., Polyakov D.A. Monitoring changes in the stress-strain state of building structures of buildings and structures based on FEM analysis of spatial coordinate models. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2007; 4:83-87. EDN MVHAEP. (rus.).

13. Ermakov V.A., Korgin A.V. Methodology for FEM assessment of the load-bearing capacity of structures taking into account the presence of defects. *Vest-*

- nik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2009; 1:26-28. (rus.).
14. Korgin A.V., Ermakov V.A. Automating creation and update of computing models when monitoring technical condition of buildings and constructions. *Internet-Vestnik VolgGASU*. 2012; 3(23):35. EDN PWPJLR. (rus.).
15. Lapidus A.A., Makarov A.N. Risk-Based Approach for the organization of construction supervision of the developer. *AIP Conference Proceedings*. 2022; 2559:060003. DOI: 10.1063/5.0099138
16. 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.).
17. Sergeeva A.Yu., Myasishchev R.Yu., Sergeev Yu.D. Identification of the causes of defects in building structures. *Current problems of construction, environmental management, cadastre and land use : collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference*. 2022; 59-63. EDN WCIAJU. (rus.).
18. Zarembo R.A., Zarembo I.A. The influence of characteristic damage and defects on the durability of reinforced concrete and concrete building structures. *Scientific research in the modern world: experience, problems and development prospects : collection of scientific articles based on materials from the III International Scientific and Practical Conference*. 2020; 270-277. EDN XYMZQR. (rus.).
19. Gusev N.N., Kucherenko A.O. Given that the stress-strain state of bearing constructions at carrying out of testing calculations of their carrying capacity. *Modern trends in the construction and operation of buildings and structures : collection of scientific papers*. 2019; 6-14. EDN PPTKGY. (rus.).
20. Pepenar I. Damage evaluation of reinforced concrete structures in aggressive environments. *7th International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering*. 2009; 14(7).
21. Gorodetsky A.S., Evzerov I.D. *Computer models of structures*. Moscow, ASV Publishing House, 2009; 360. (rus.).
22. Malakhova A.N. Calculation of flat floor slabs of a monolithic frame building taking into account the non-linear operation of materials. *System Technologies*. 2022; 2(43):41-47. DOI: 10.55287/22275398_2022_2_41. EDN BUUJYO. (rus.).
23. Smolyago G.A., Frolov N.V. Modeling of corrosion-damaged reinforced concrete beams in LIRA-SAPR. *Safety of the Russian building stock. Problems and solutions: materials of International Academic Readings*. 2020; 266-271. EDN ZZNVDN. (rus.).
24. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V., Popov D.S., Kurchenko N.S. Load-bearing capacity of corrosion-damaged compressed reinforced concrete elements under transverse loading. *Industrial and Civil Engineering*. 2023; 9:5-11. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.09.05-11. EDN BMPSSJ. (rus.).
25. Korgin A.V., Zeyd Kilani L.Z., Ermakov V.A. Heath Monitoring of Building Constructions with Crack-like Defects. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2013; 12:77-83. (rus.).
26. Malakhova A.N. Features of monolithic beam floor operation under load. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2013; 11:50-57. EDN ROWKDD. (rus.).
27. Malakhova A. Estimation of cracking of reinforced concrete load-bearing construction structures at the stage of their technical inspection. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:02040. DOI: 10.1051/matec-conf/201825102040
28. Koyankin A.A., Beletskaya V.I., Guzhevskaya A.I. The influence of concrete joints on the structural behavior. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2014; 3:76-81. EDN RYXTND. (rus.).
29. Deineko A.V., Kurochkina V.A., Yakovleva I.Yu., Starostin A.N. Design of reinforced concrete slabs subject to the construction joints. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2019; 14(9):(132):1106-1120. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.9.1106-1120. EDN AOFARH. (rus.).
30. Pisarev S.V., Astakhov N.N. Assessment of the technical condition of building structures with typical violations of construction technology. *Priority Scientific Directions: From Theory to Practice*. 2014; 12:142-148. EDN SGYHOZ. (rus.).
31. Malakhova A.N. Possible complex causes of the appearance of cracks in the walls of an underground reservoir. *Building and Reconstruction*. 2018; 1(75):67-71. EDN XNZASL. (rus.).

Поступила в редакцию 12 ноября 2024 г.

Принята в доработанном виде 30 декабря 2024 г.

Одобрена для публикации 21 февраля 2025 г.

B I O N O T E S : **Anna N. Malahova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0203-0193; MalahovaAN@mgsu.ru, malahov@ngnext.ru.

Влияние режима пескоструйной обработки на шероховатость поверхности фрикционных соединений

Андрей Александрович Василькин, Илья Андреевич Василькин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В текущей практике основное влияние на работу фрикционных болтовых соединений стальных элементов оказывают коэффициент трения соединяемых поверхностей и усилие натяжения болта. Коэффициент трения прежде всего зависит от состояния контактных поверхностей. Для увеличения коэффициента трения применяют различные конструктивные способы. Наиболее эффективным способом подготовки контактных поверхностей фрикционных соединений или соединений на болтах с контролируемым натяжением является пескоструйная обработка, воздействие которой позволяет получить наибольшее значение коэффициента трения. Большинство существующих конструктивных норм определяют, что обработка контактных поверхностей указывается в проектной документации. Дополнительно уточняется, что шероховатость контактной поверхности после обработки должна составлять не более $R_z 40$. Проведение замеров шероховатости обработанной поверхности на монтажной площадке увеличивает трудоемкость выполнения работ, поэтому важно понимать, какое влияние оказывают различные режимы пескоструйной обработки или отступления от предписанного режима на шероховатость поверхности, что может привести к снижению величины коэффициента трения.

Материалы и методы. Выполнено исследование влияния 5 различных режимов пескоструйной обработки кварцевым песком на шероховатость 10 стальных пластин из низколегированной стали 09Г2С. Определение шероховатости проведено на профилометре M. ERA Platinum D1 с разрешением 7 нм.

Результаты. В общей сложности осуществлены 20 замеров шероховатости поверхности с построением профилей поверхности и определение средних значений R_a и R_z . Показано, что предложенные режимы обработки создают различную шероховатость на поверхности стальных пластин. Один из режимов создает наибольшее значение шероховатости.

Выводы. Сделаны выводы о корреляции между режимом пескоструйной обработки и шероховатостью поверхности. Полученные результаты сравнивались с прочими конструктивными способами обработки контактных поверхностей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фрикционное соединение, шероховатость, пескоструйная обработка, соединение с контролируемым натяжением, болтокомплект, режим обработки, высокопрочный болт

Благодарности. Авторы выражают благодарность Главному региональному центру коллективного пользования научным оборудованием и установками НИУ МГСУ, ЛИСМИИК НИИ ЭМ, кафедре метрологии и взаимозаменяемости МГТУ им. Н.Э. Баумана.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Василькин А.А., Василькин И.А. Влияние режима пескоструйной обработки на шероховатость поверхности фрикционных соединений // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 4. С. 516–528. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.516-528

Автор, ответственный за переписку: Андрей Александрович Василькин, vasilkinaa@mgsu.ru.

The influence of sandblasting mode on the surface roughness of friction joints

Andrey A. Vasil'kin, Ilya A. Vasilkin

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

ABSTRACT

Introduction. In current practice, the operation of friction bolted joints of steel elements is evaluated based on the coefficient of friction and the bolt tension force. The coefficient of friction depends on the condition of the contact surfaces. Various constructive methods are used to increase it. The most effective way to prepare the contact surfaces of friction joints or bolt joints with controlled tension is sandblasting, which creates the highest coefficient of friction. Most of the existing design standards specify that the treatment of contact surfaces is specified in the design documentation. Additionally, it is specified that the roughness of the contact surface after processing should be no more than $R_z 40$. Measuring the roughness of the treated surface on the installation site is quite a difficult task, therefore it is necessary to understand exactly how different modes of sandblasting or deviations from the prescribed regime affect the surface roughness, which can lead to lower values of the coefficient of friction.

Materials and methods. In this paper, the properties of 5 different modes of sandblasting contact surfaces with quartz sand on the roughness of 15 steel plates made of low-alloy steel 09G2C, made on a profilometer M. ERA Platinum D1, were studied.

Results. A total of 20 tests were carried out to determine the roughness with the construction of surface profiles and the determination of the average values of R_a and R_z . It was shown that the proposed processing modes create different roughness on the surface of steel plates. One of the modes creates the highest average roughness value.

Conclusions. Conclusions are drawn about the correlation between the processing mode and the surface roughness. The results obtained were compared with other traditional constructive methods of processing contact surfaces.

KEYWORDS: slip resistance, surface treatment, sandblasting, slip-critical bolted connections, surface roughness

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the Main Regional Center for Collective Use of Scientific Equipment and Installations of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); the Laboratory for Testing Building Materials, Products and Structures of the Research Institute of Experimental Mechanics, and the Department of Metrology and Interchangeability of Bauman Moscow State Technical University.

FOR CITATION: Vasil'kin A.A., Vasilkin I.A. The influence of sandblasting mode on the surface roughness of friction joints. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(4):516-528. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.516-528 (rus.).

Corresponding author: Andrey A. Vasil'kin, vasilkinaa@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Болты с контролируемым усилием натяжения, или болты с предварительным натяжением, были впервые применены после Второй мировой войны в качестве замены старых заклепок, которые использовались как крепеж на мостах в Соединенных Штатах Америки. Вскоре они стали использоваться в болтовых соединениях строительных и мостовых конструкций, подверженных динамическим нагрузкам [1].

Одним из главных преимуществ болтовых соединений с предварительным натяжением является их жесткость на сдвиг. В отличие от болтовых соединений со сдвигом, где несущая способность соединения обеспечивается после незначительного проскальзывания в соединении, болты с предварительным натяжением не проскальзывают до тех пор, пока не будет преодолено сопротивление трению. Это служит основной причиной их хорошей работы при динамическом нагружении [2].

Основы проектирования фрикционных соединений и расчета их несущей способности совпадают по физическому принципу в европейских¹, американских², канадских³, австралийских⁴, китайских⁵ и отечественных нормах⁶.

¹ CEN — EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1–8: Design of joints, European Committee for Standardization, Brussels, 2005.

² AISC. Specification for structural steel buildings. ANSI/AISC 360-10: An American National Standard, American Institute of Steel Construction, INC., Chicago, USA, 2010.

³ CAN/CSA — S6-06. Canadian highway bridge design code. Canadian Standards Association, Mississauga, 2006.

⁴ AS/NZS 1252.1:2016. High-Strength Steel Fastener Assemblies for Structural Engineering — Bolts, Nuts and Washers — Part 1: Technical Requirements. Standards Australia, Sydney, Australia, 2016.

⁵ GB 50017–2017. Standard for Design of Steel Structures. China National Standardization Administration Committee: Beijing, China, 2011.

⁶ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23–81*. Редакция 6.

Работа болтов с контролируемым натяжением или соединений с предварительным натяжением болтов в терминологии европейских норм активно исследуется во всем мире. Учитывая, что наибольшее значение коэффициента трения поверхностей без покрытия получается после пескоструйной обработки, значительное количество исследований направлено на экспериментальное определение коэффициента трения для разных сталей и различных способов обработки контактных поверхностей.

В отечественных нормах для пескоструйной обработки указан коэффициент трения, равный 0,58, в Еврокоде EN 1993-1-8 указано значение $\mu \geq 0,50$. В Руководстве 1 по проектированию соединений Австралийского института стали [3] сообщается, что струйная очистка обрабатываемой поверхности увеличивает коэффициент трения по сравнению с необработанной поверхностью, очищенной от окалины, и средний коэффициент трения составляет 0,51 (при стандартном отклонении 0,09) на основании 186 испытаний сталей по ASTM A7, A36 и стали Fe37.

В англоязычной литературе при описании работы фрикционного соединения используется термин slip coefficient, что переводится как коэффициент скольжения. По сути, это аналог нашего понятия коэффициента трения.

Wang и соавт. [4] измерили коэффициент трения пластин из аустенитной нержавеющей стали марки 316 с обработкой поверхностей пескоструйным способом и установили, что коэффициент трения при этом был ниже 0,21.

Stranghöner и соавт. [5, 6] провели исследования по определению коэффициента трения различных марок нержавеющей стали и сравнили четыре вида обработки поверхности (необработанная, пескоструйная обработка, дробеструйная обработка и пескоструйная обработка поверхности с металлизированным покрытием из алюминиевого напыления). Полученный коэффициент трения аустенитной нержавеющей стали с шероховатостью $R_z > 45$ составляет $\mu \geq 0,4–0,5$, что в два раза выше, чем из ссылки [4].

В статье Zhang и соавт. [7] при исследовании метода обработки двух контактных поверхностей, когда одна поверхность обрабатывается присадочным покрытием (HVOF-покрытие порошком из нержавеющей стали), а вторая поверхность обрабатывается абразивными частицами (пескоструйная обработка) установлен коэффициент трения при пескоструйной обработке обеих поверхностей, который составил $\mu = 0,26$ при шероховатости R_a , равной 5,93.

Cruz и соавт. [8] и Heistermann и соавт. [9] сообщают, что коэффициент трения для мягкой стали S275, аналог отечественной С275, составляет 0,47 и 0,50 в зависимости от типа песка, используемого при пескоструйной обработке.

В работе Cruz [8] рассматривается шесть видов обработки поверхности мягкой стали S 275. В первых двух сериях эксперимента контактные поверхности подвергались струйной очистке песком (тип А), дробью или абразивом (тип В) без последующего нанесения покрытия; в следующих четырех сериях (типы С, D, Е и F) поверхности пластин подвергались струйной очистке дробью или абразивом и покрывались поверхностными обработками. Коэффициенты скольжения со значениями 0,50 получены только для поверхностей, подвергнутых струйной обработке, без какой-либо дополнительной обработки поверхности (типы А и В). На поверхностях, подвергнутых струйной обработке, металлизированных цинком методом распыления (тип С) или оцинкованных методом горячего погружения (тип D), коэффициент скольжения достигает значения 0,40. Для поверхностей, подвергнутых струйной обработке, с нанесением покрытия из этилсиликата цинка (тип Е), получено значение 0,40. Для поверхностей, подвергнутых струйной обработке, с нанесением цинкоэпоксидного покрытия (тип F) получены самые низкие значения коэффициента скольжения (не выше 0,30).

В образцах стали S 275 и высокопрочной стали S 690 с эквивалентной пескоструйной обработкой поверхности были получены схожие значения коэффициента трения. На основании представленных результатов можно сделать вывод, что коэффициент скольжения сильно зависит от обработки поверхности, снижается при нанесении металлического покрытия после пескоструйной обработки и слабо зависит от марки стали.

Annap и соавт. [10] определили, что средний коэффициент скольжения для поверхностей, очищенных пескоструйной обработкой, из стали CAN/CSA G40.21 350, аналог из стали 3, составляет 0,53.

В работе [11] сообщается о результатах лабораторных испытаний, касающихся оценки коэффициента скольжения поверхностей с пескоструйной обработкой с полученным средним значением $\mu = 0,454$. В качестве наиболее значимых параметров, влияющих на коэффициент скольжения, указаны усилие натяжения болта и шероховатость поверхности.

Пескоструйная или дробеструйная обработка — это процесс, при котором металлические или керамические частицы угловатой формы переносятся потоком сжатого воздуха и выбрасываются на поверхность обрабатываемого материала с целью устранения загрязненных слоев и изменения шероховатости поверхности. Данная процедура выполняется перед нанесением на материал термического напыления, подготовкой поверхности перед нанесением покрытия методом погружения и подготовкой поверхности для соединения на болтах с контролируемым натяжением.

Полученная шероховатость зависит от параметров пескоструйной обработки, например давления струи, угла, расстояния от сопла, размера и типа частиц и т.д.

Влияние параметров процесса пескоструйной обработки на шероховатость поверхности обсуждалось в литературе [12–18].

Пескоструйная обработка также может влиять на кристаллическую структуру [19, 20], микрожесткость [21], прочность [19, 20] и микроструктуру вблизи поверхности [22].

Пескоструйная обработка используется в качестве поверхностной механической обработки для различных материалов, таких как сталь [22, 23], алюминиевые и титановые сплавы [24, 21], керамика [19, 20, 24], полимеры и композиты [25].

Эффект пескоструйной обработки зависит от природы обрабатываемого материала, его жесткости и свойств поверхности [26]. Применение одного и того же метода пескоструйной обработки к двум разным материалам не приведет к получению одинаковой шероховатости или геометрического профиля [22]. Материалы с более низкой прочностью имеют низкую пластичность поверхности, поэтому они более восприимчивы к повреждению поверхности.

Такие параметры обработки, как угол пескоструйной обработки [24], давление [17, 18], расстояние [16, 21], продолжительность [21], природа песка [16, 18] и гранулометрия [16] широко изучаются исследователями для определения химических и физических свойств материалов.

В качестве абразивного материала при пескоструйной обработке может применяться алюминиевый песок [18, 20] и обычный кварцевый песок (glace sand) [16, 27, 28].

Сравнительный анализ двух средних значений для больших выборок результатов исследования [29] показал, что изменение гранулометрии кварцевого песка повлияло на 92 % средней шероховатости R_a обработанных образцов. Образцы, обработанные с самой высокой гранулометрией (G200/300), показали самую высокую R_a , в то время как образцы, обработанные с самой низкой гранулометрией (G90/150 и G70/110), показали самую низкую R_a . Образцы, обработанные гранулометрией глазурированного песка G90/150 и G70/110, имели разные значения R_a , не

смотря на их сходимость в значениях. После обработки глазурированным песком G200/300 поверхность оцинкованной стали становилась более шероховатой, чем у необработанных образцов. Противоположные результаты наблюдались с двумя другими гранулометриями (G90/150, G70/110), где R_a уменьшалась с $1,2 \pm 0,26$ мкм для необработанных образцов до минимума $0,94 \pm 0,074$ мкм в случае обработанных образцов G90/150.A90.P5.

Отмечено, что шероховатость увеличивается с ростом давления дробеструйной обработки и уменьшается с повышением расстояния отступа [29]. Однако ниже критического расстояния отступа шероховатость поверхности низкая. Шероховатость поверхности увеличивается с углом дробеструйной обработки до тех пор, пока угол не составит около 75° . В то же время имеются исследования, согласно которым изменение угла пескоструйной обработки не влияет на шероховатость поверхности [30].

Удаление материала при дробеструйной обработке происходит в результате процесса эрозии, где активны такие механизмы, как микрорезание, пропахивание и экструзия [31]. При дробеструйной обработке поверхность подвергается упрочнению, и на верхнем слое, типичная толщина которого составляет несколько мкм, образуется область нанозерен.

В отечественных нормативных указаниях при пескоструйной обработке⁷ устанавливается давление воздуха пескоструйного аппарата в диапазоне 0,35–0,50 МПа, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности 10–15 см, угол распыления 50 – 75° .

При применении пескоструйной обработки в условиях строительной площадки в силу различных причин возможны отступления от нормативных требований. Поэтому более глубокое понимание влияния различных режимов пескоструйной обработки на шероховатость соединяемых поверхностей важно для обеспечения требуемой несущей способности стыка элементов.

В данной работе изучается влияние давления и расстояния от сопла при пескоструйной обработке на шероховатость стальной поверхности с целью

⁷ СТП 006–97. Устройство соединений на высокопрочных болтах в стальных конструкциях мостов : введен 01.01. 1998. М. : Трансстрой, 1998.

повышения коэффициента трения и определения оптимальных параметров пескоструйной обработки для получения более высокой несущей способности фрикционных соединений на болтах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пескоструйная обработка или дробеструйная обработка дробью использует абразивные частицы неправильной или сферической формы для придания поверхности стали определенной шероховатости. Давление аппарата, расстояние от сопла, угол распыления, а также состав и фракция песка являются основными факторами, оказывающими непосредственное влияние на шероховатость поверхности и, как следствие, несущую способность фрикционного соединения. Чтобы исследовать влияние двух из вышеуказанных параметров, пластины подвергли пескоструйной обработке сжатым воздухом давлением от 3 до 6 атм, углом распыления 60° , расстоянием распыления от 150 до 400 мм и размером абразивных частиц от 0,5 до 2,0 мм.

Образцы для исследования были сконструированы в соответствии с требованиями, приведенными в документах^{8,9}. Образец состоит из трех пластин и соединен одним высокопрочным болтом M14 класса прочности 10.9 по немецкому стандарту DIN 931 и высокопрочными шайбой и гайкой из стали по немецкому стандарту DIN 934 (рис. 1). Наружные пластины (тип 1) и внутренние пластины (тип 2) имеют размер 100×100 мм и толщину 6 мм. Пластины изготовлены из низколегированной стали марки 09Г2С. Диаметр отверстия для болта 17 мм выполнен лазерной резкой.

В этой статье использовано пять различных способов пескоструйной обработки поверхности пластин фрикционных соединений. Исследованы три значения давления подачи песка и два варианта расстояния от сопла до поверхности обработки. В общей сложности было обработано 15 образцов (табл. 1).

⁸ СТО НОСТРОЙ 2.10.76–2012. Болтовые соединения. Правила и контроль монтажа, требования к результатам работ. М. : ЦНИИПСК им. Мельникова, 2013. 57 с.

⁹ ГОСТ Р 70132–2022. Сборка болтовых соединений строительных металлических конструкций. Правила и контроль выполнения работ. 2022.



а

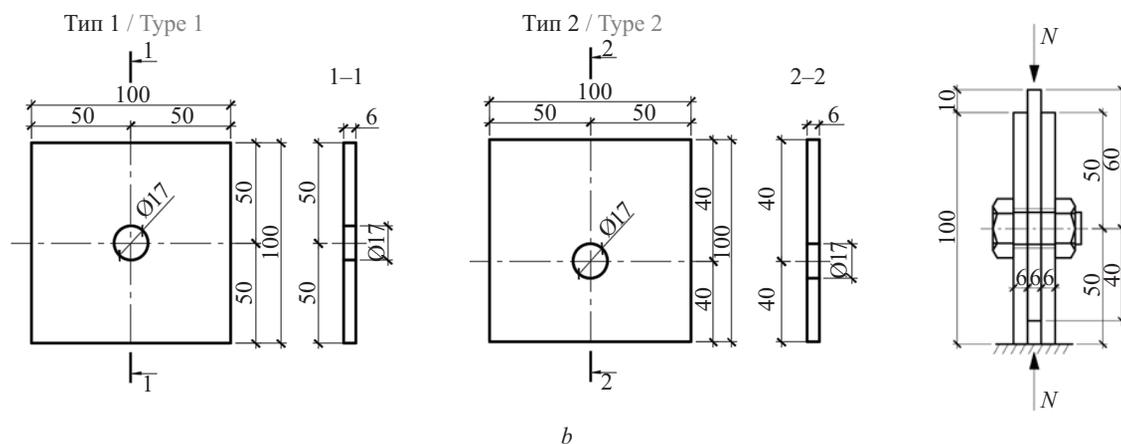


Рис. 1. Образцы для испытаний: а — фото; б — чертёж

Fig. 1. Test specimens: a — photo; b — schematic drawing

Табл. 1. Описание образцов для определения шероховатости поверхности

Table 1. Description of specimens for determining the roughness of the friction surface

Виды обработки Types of processing	Идентификатор образца Specimen number	Давление подачи песка, атм Sand supply pressure, atm	Расстояние сопла от поверхности, см Distance from the surface, cm	Угол распыления Spray angle
1-й вид 1 type	1-1	3	15	60°
	1-2			
	1-3			
2-й вид 2 type	2-1	5	15	
	2-2			
	2-3			
3-й вид 3 type	3-1	5	40	
	3-2			
	3-3			
4-й вид 4 type	4-1	6	15	
	4-2			
	4-3			
5-й вид 5 type	5-1	6	40	
	5-2			
	5-3			

Обозначение образцов принято от 1–1 до 5–3. Подготовленные образцы обработаны кварцевым песком фракцией 0,5–2,0 мм (рис. 2). Сопло удерживается в положении путем жесткого элемента регулируемой длины, с помощью которого можно установить расстояние отступа между пластиной и соплом. После того как угол и расстояние отступа зафиксированы, пескоструйная обработка образца выполняется за счет перемещения сопла по обрабатываемой поверхности.

Виды обработки образцов выбирались исходя из требований нормативного документа⁷. Сопло пескоструйного аппарата должно располагаться на расстоянии 10–15 см под углом 60° к очищаемой поверхности. Угол распыления не менялся.

Для исследования подготовлено 15 комплектов пластин, каждый комплект состоит их трех пластин.

С целью нивелирования влияния посторонних факторов на обработку поверхности для каждого способа обработки подготовлено по три образца. За рубежом чаще всего используют по 5 образцов, считается, что такое количество является достаточным с использованием статистической обработки [8, 9]. Максимально используемое количество образцов в количестве 20 для каждого способа обработки поверхности соединяемых пластин было применено при проведении европейского исследовательского проекта «Выполнение и надежность противоскользящих соединений для стальных конструкций с использованием CS и SS» (Execution and reliability of slip-



Рис. 2. Шаблон для обеспечения угла распыления и расстояния до поверхности элемента

Fig. 2. A template to ensure the angle of inclination and distance to the surface of the element

resistant connections for steel structures using CS and SS) Европейского сообщества (RFSR-CT-2014-00024) по определению коэффициентов трения для различных марок нержавеющей стали с различной обработкой поверхности в рамках подготовки новой редакции Еврокода EN 1090-2 [5].

После пескоструйной обработки были отобраны по 2 пластины каждого вида обработки для измерения шероховатости.

Шероховатость поверхности пластин определялась с помощью контурографа-профилометра M. ERA Platinum D1 на кафедре метрологии и взаимозаменяемости МГТУ им. Н.Э. Баумана (рис. 3).

Работа устройства заключается в сканировании поверхностных неровностей с помощью консоли с алмазным наконечником. Механические колебания щупа преобразуются в напряжения, которые соответствуют этим колебаниям. Затем сигналы усиливаются и обрабатываются микропроцессом. Информация

о шероховатости и геометрических характеристиках поверхности выводится на экран монитора системы управления в форме графических профилей и числовых показателей.

Технические характеристики измерительного прибора Platinum D1 приведены в табл. 2.

Фракция песка, используемого для пескоструйной очистки, составляет от 0,5 до 2 мм, что предположительно дает шероховатость R_z в диапазоне от 20 до 45 мкм. Исходя из этого, по ГОСТ¹⁰ принимаем базовую длину $l = 2,5$ мм для R_z от 20 до 45 мкм.

Поскольку фактическая шероховатость поверхности пластины распределена неравномерно, за шероховатость поверхности R_a было принято среднее значение из трех контрольных точек на каждой пластине. При определении шероховатости исследовано по 4 плоскости трения каждого вида обработки. После этого устанавливалось среднее значение шероховатости для данного способа обработки.

Результаты проведенных исследований шероховатости приведены в табл. 3. В отчете об измерении шероховатости выведен профиль поверхности и ряд параметров шероховатости (рис. 4).

В результате исследования установлено, что средняя шероховатость поверхности R_a составляет 8,5–10,8 мкм. Наибольшая высота неровностей находится в пределах от 52,9 до 67,2 мкм. Количество неровностей на 1 пог. мм поверхности составляет 4–5.

На рис. 5 приведен график распределения средних значений R_z (сумма средних значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины l , мкм) для каждого вида обработки с результирующей

¹⁰ ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики : введ. 01.01.1975. М. : Стандартинформ, 2018.

Табл. 2. Технические характеристики профилометра

Table 2. Technical characteristics of the profilometer

Контурограф-профилометр Contourograph profilometer	Platinum D1	
Диапазон измерений Measuring range	Ось X (горизонтальная) X-axis (horizontal)	150 мм / mm
	Ось Y (колонна) Y-axis (column)	420 мм / mm
	Ось Z1 (щуп) Z1 axis (probe)	Контур: 50 (±25) мм Surface: 50 (±25) mm Шероховатость: ±420 мкм Roughness: ±420 μm
Погрешность (шероховатость) Accuracy (roughness)	Линейная Linear	≤ ±(7 нм / nm + 3,5 %)
	Шумы Inaccuracy	≤ 0,025 мкм / μm
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений параметра шероховатости Limits of the permissible relative measurement error of the roughness parameter	R_a , %	±3,0, но не менее 5 нм ±3.0, but not less than 5 nm

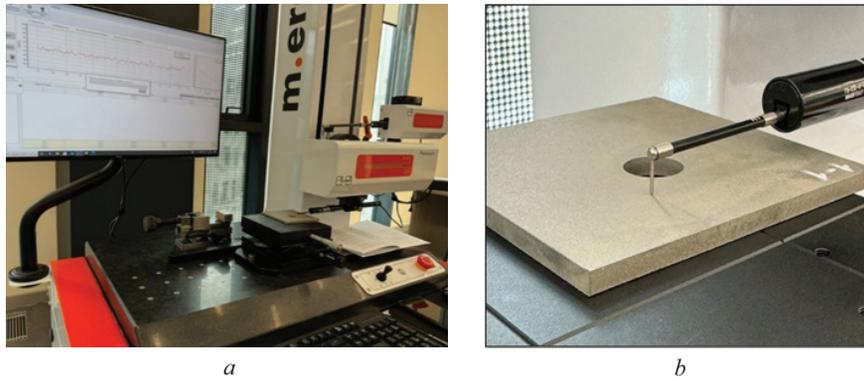


Рис. 3. Установка для измерения профиля поверхности: а — контурограф-профилометр; б — образец для испытания
 Fig. 3. A template to ensure the angle of inclination and distance to the surface of the element: а — contourograph-profilometer; б — test specimens

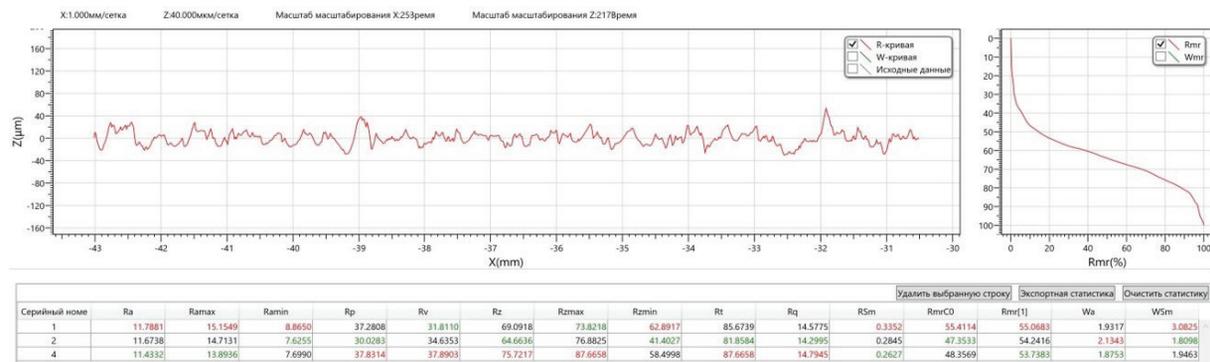


Рис. 4. Профиль поверхности образца

Fig. 4. Specimen surface profile

Табл. 3. Результаты измерения шероховатости в пределах базовой длины L

Table 3. Roughness measurement results within the base length L

Номер образца Number models	Среднее арифметическое отклонение профиля R_a , мкм The arithmetic mean deviation of the profile R_a , μm	Наибольшая высота профиля R_z , мкм The highest profile height R_z , μm	Полная высота профиля R_{max} , мкм Full profile height R_{max} , μm	Средний шаг неровностей профиля R_{Sm} , мм The average pitch of the profile irregularities R_{Sm} , mm	Количество неровностей на 1 пог. мм Number of irregularities per 1 mm
<i>Вид 1 (давление — 3 атм, расстояние — 15 см, угол — 60°) Type 1 (pressure — 3 atm, distance — 15 cm, angle — 60°)</i>					
1-1	7,4	45,4	56,0	0,2	5
1-1 реверс 1-1 Another	9,7	59,2	80,1	0,2	4
1-2	7,2	44,4	55,2	0,2	5
1-2 реверс 1-2 Another	9,7	62,5	90,0	0,2	5
Среднее The average value	8,5	52,9	70,3	0,2	5
<i>Вид 2 (давление — 5 атм, расстояние — 15 см, угол — 60°) Type 2 (pressure — 5 atm, distance — 15 cm, angle — 60°)</i>					
2-1	11,6	69,8	85,1	0,3	3
2-1 реверс 2-1 Another	10,0	66,3	97,6	0,2	4

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Номер образца Number models	Среднее арифметическое отклонение профиля R_a , мкм The arithmetic mean deviation of the profile R_a , μm	Наибольшая высота профиля R_z , мкм The highest profile height R_z , μm	Полная высота профиля R_{max} , мкм Full profile height R_{max} , μm	Средний шаг неровностей профиля R_{Sm} , мм The average pitch of the profile irregularities R_{Sm} , mm	Количество неровностей на 1 пог. мм Number of irregularities per 1 mm
2–2	10,8	65,0	88,5	0,3	4
2–2 реверс 2–2 Another	10,9	67,5	91,2	0,3	4
Среднее The average value	10,8	67,2	90,6	0,3	4
<i>Вид 3 (давление — 5 атм, расстояние — 40 см, угол — 60°) Type 3 (pressure — 5 atm, distance — 40 cm, angle — 60°)</i>					
3–1	8,6	51,6	64,8	0,2	5
3–1 реверс 3–1 Another	10,0	61,8	85,8	0,2	4
3–2	8,9	57,8	73,3	0,2	5
3–2 реверс 3–2 Another	8,5	56,8	83,7	0,2	5
Среднее The average value	9,0	57,0	76,9	0,2	5
<i>Вид 4 (давление — 6 атм, расстояние — 15 см, угол — 60°) Type 4 (pressure — 6 atm, distance — 15 cm, angle — 60°)</i>					
4–1	8,3	52,4	66,3	0,2	5
4–1 реверс 4–1 Another	10,8	66,2	88,9	0,3	4
4–2	10,0	57,6	73,9	0,2	5
4–2 реверс 4–2 Another	9,4	56,2	70,7	0,2	5
Среднее The average value	9,6	58,1	75,0	0,2	5
<i>Вид 5 (давление — 6 атм, расстояние — 40 см, угол — 60°) Type 5 (pressure — 6 atm, distance — 40 cm, angle — 60°)</i>					
5–1	10,8	71,1	89,8	0,2	5
5–1 реверс 5–1 Another	7,6	52,7	64,5	0,2	6
5–2	10,4	62,1	91,0	0,2	5
5–2 реверс 5–2 Another	6,7	46,3	55,9	0,1	7
Среднее The average value	8,9	58,1	75,3	0,2	5

щей кривой. По оси абсцисс расположены различные виды обработки поверхности трения согласно табл. 1. Из представленных данных следует, что второй способ обработки показывает наибольшие значения шероховатости R_z со средним значением 67,2 мкм, также для данного способа обработки шероховатость четырех поверхностей имеет минимальное среднее квадратичное отклонение.

Среднее значение шероховатости поверхности при втором виде пескоструйной обработки на 27 % больше, чем при втором способе обработки, и на 17 % больше, чем при третьем, четвертом и пятом способе обработки.

В табл. 4 приведено сравнение шероховатости поверхности при обработке, предложенной технологии с результатами других авторов [7]. В представленном

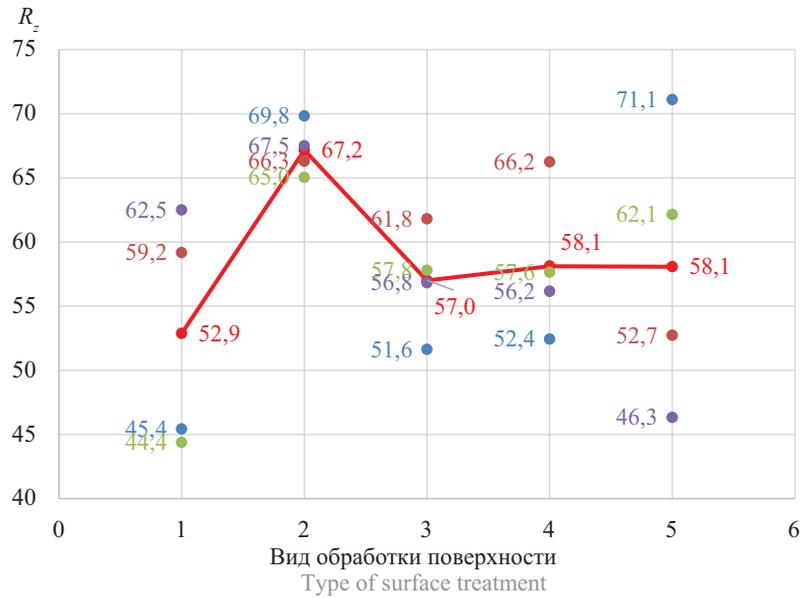


Рис. 5. Взаимосвязь между способом обработки и шероховатостью

Fig. 5. Relationship between processing method and roughness

Табл. 4. Результаты теста на шероховатость

Table 4. Roughness test results

Обработка поверхности Surface treatment	Шероховатость R_a , мкм Roughness R_a , μm
Полирование [1] Polishing [1]	0,19
Притирка [1] Lapping [1]	0,28
Фрезерование [1] Milling [1]	3,84
Полирование [1] Polishing [1]	1,10
Очистка щеткой [7] Brushing [7]	5,22
Пескоструйная обработка [7] Sandblasting [7]	5,93
Дробеструйная обработка [7] Shot blasting [7]	4,46
Пескоструйная обработка — покрытие распыленным металлом [7] Sandblasting — HVOF coating [7]	8,75
Пескоструйная обработка (давление — 3 атм, расстояние — 15 см) Sandblasting (pressure — 3 atm, distance — 15 cm)	8,5
Пескоструйная обработка (давление — 5 атм, расстояние — 15 см) Sandblasting (pressure — 5 atm, distance — 15 cm)	10,8
Пескоструйная обработка (давление — 5 атм, расстояние — 40 см) Sandblasting (pressure — 5 atm, distance — 40 cm)	9,0
Пескоструйная обработка (давление — 6 атм, расстояние — 15 см) Sandblasting (pressure — 6 atm, distance — 15 cm)	9,6
Пескоструйная обработка (давление — 6 атм, расстояние — 40 см) Sandblasting (pressure — 6 atm, distance — 40 cm)	8,9

исследовании использована низколегированная сталь 09Г2С с нормативным пределом текучести 345 МПа и временным сопротивлением 490 МПа, относительное удлинение 20 %. В работе [7] авторы испытывали пластины из аустенитной нержавеющей стали S31608 с условным пределом текучести 205 МПа и пределом прочности 515 МПа, данная сталь обладает значительной пластичностью с относительным удлинением $\delta = 40\%$ ¹¹, т.е. более пластичной стали. Режим пескоструйной обработки [7] был следующий: давление сжатого воздуха от 0,6 до 0,8 МПа, угол распыления от 15 до 30°, расстояние распыления от 10 до 30 см. Получается, что при более остром угле распыления (30° в [7] и 60° в настоящем исследовании) получается меньшая шероховатость, несмотря на сопоставимое давление (6–8 и 6 атм) и расстояние от сопла (10–30 и 15 см) соответственно. Интересно было бы исследовать, как меняется шероховатость поверхности при изменении угла распыления от 30 до 90°.

Различные значения шероховатости, указанные в табл. 4 для одного вида обработки (полирование), для исследований, выполненных Ivkovic и соавт. [1] и Zhang и соавт. [7], можно объяснить тем, что поверхности одного класса шероховатости, но с различными способами обработки могут иметь различную шероховатость.

Подобные отечественные исследования влияния пескоструйной обработки на шероховатость поверхности проводились А.С. Чесноковым в Институте инженеров геодезии и аэрофотосъемки в начале 70-х гг. прошлого века [32]. А.С. Чесноков по-

лучил, что средняя высота неровностей составляет $R_z = 85$ мкм и количество неровностей 7–8 на 1 пог. мм для образцов из кипящей малоуглеродистой стали марки СтЗкп. При этом точность измерения составляла 0,01–0,03 мм. В настоящем исследовании использованное современное оборудование с точностью $0,7 \cdot 10^{-5}$ мм показало R_z в диапазоне 52–67 мм с количеством неровностей на 1 пог. мм, равным 4–5.

Можно отметить, что, несмотря на имеющееся в распоряжении А.С. Чеснокова оборудование, которое уступает точности современных приборов на 4 порядка, полученные им данные сопоставимы с результатами настоящей работы, что свидетельствует о высоком уровне отечественных экспериментальных исследований, положенных в основу нормативных документов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Шероховатость контактной поверхности оказывает непосредственное влияние на коэффициент статического трения. В данном исследовании рассмотрено 5 вариантов пескоструйной обработки контактных поверхностей фрикционных соединений, отличающихся давлением и расстоянием от сопла. Была измерена шероховатость 15 поверхностей стальных пластин из стали 09Г2С с построением профиля поверхности. Обнаружено, что в одном из вариантов обработки при расстоянии 15 см и давлении 5 атм, шероховатость поверхности на 17 и 27 % превышает шероховатость при остальных способах обработки. В настоящей работе также сравнивались шероховатости поверхности, полученные в исследованиях зарубежных авторов.

¹¹ URL: http://www.ccsteels.com/Stainless_steel/1692.html

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ivkovic B., Durdjanovic M., Stamenkovic D. The Influence of the contact surface roughness on the static friction coefficient // Tribology in industry. 2000. Vol. 22. Issue 3–4. Pp. 41–44.
2. Туснин А.П., Тихонов С.М., Алехин В.Н., Беляева З.В., Кудрявцев С.В., Рыбаков В.А. и др. Проектирование металлических конструкций. Часть 1. Металлические конструкции. Материалы и основы проектирования : учебник для вузов. М. : Издательство «Перо», 2020. 468 с. EDN BQNCPS.
3. Hogan T.J., Munter S.A. Design Guide 1: Bolt- ing in Structural Steel Connections. Australia : Australian Steel Institute, 2007.
4. Wang Y., Guan J., Zhang Y., Yang L. Experimental Research on Slip Factor in Bolted Connection with Stainless Steel // Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science). 2013. Vol. 29. Issue 5. Pp. 769–774.
5. Stranghöner N., Afzali N., de Vries P., Schedin E., Pilhagen J. Slip factors for slip-resistant connections made of stainless steel // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 152. Pp. 235–245. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.07.005
6. Stranghöner N., Afzali N., de Vries P., Schedin E., Pilhagen J., Cardwell S. Slip-resistant bolted connections of stainless steel // Steel Construction. 2017. Vol. 10. Issue 4. Pp. 333–343. DOI: 10.1002/stco.201710044
7. Zhang T., Bu Y., Wang Y., Chen Z., He W. Experimental Study on the Slip Behaviour of Stainless Steel High-Strength Bolted Connections with a New Surface Treatment // Materials. 2022. Vol. 15. Issue 16. P. 5672. DOI: 10.3390/ma15165672
8. Cruz A., Simões R., Alves R. Slip factor in slip resistant joints with high strength steel // Journal of Constructional Steel Research. 2012. Vol. 70. Pp. 280–288. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.11.001
9. Heistermann C., Veljkovic M., Simões R., Rebelo C., da Silva L.S. Design of slip resistant lap joints with long open slotted holes // Journal of Constructional Steel Research. 2013. Vol. 82. Pp. 223–233. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.11.012

10. *Annan C.-D., Chiza A.* Slip resistance of metalized-galvanized faying surfaces in steel bridge construction // *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 95. Pp. 211–219. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.12.008
11. *Maiorana E., Zampieri P., Pellegrino C.* Experimental tests on slip factor in friction joints: comparison between European and American Standards // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2017. Vol. 12. Issue 43. Pp. 205–217. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.43.16
12. *Chander K.P., Vashista M., Sabiruddin K., Paul S., Bandyopadhyay P.P.* Effects of grit blasting on surface properties of steel substrates // *Materials & Design*. 2009. Vol. 30. Issue 8. Pp. 2895–2902. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.01.014
13. *Day J., Huang X., Richards N.* Examination of a grit-blasting process for thermal spraying using statistical methods // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2005. Vol. 14. Issue 4. Pp. 471–479. DOI: 10.1361/105996305x76469
14. *Varacalle D.J., Guillen D.P., Deason D.M., Rhodaberger W., Sampson E.* Effect of grit-blasting on substrate roughness and coating adhesion // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2006. Vol. 15. Issue 3. Pp. 348–355. DOI: 10.1361/105996306x124347
15. *Mohammadi Z., Ziaei-Moayyed A., Sheikh-Mehdi Mesgar A.* Grit blasting of Ti–6Al–4V alloy: optimization and its effect on adhesion strength of plasma-sprayed hydroxyapatite coatings // *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. Vol. 194. Issue 1–3. Pp. 15–23. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.03.119
16. *Rudawska A., Danczak I., Maller M., Valasek P.* The effect of sandblasting on surface properties for adhesion // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2016. Vol. 70. Pp. 176–190. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2016.06.010
17. *Khan A.A., Al Kheraif A.A., Alhijji S.M., Matinlinna J.P.* Effect of grit-blasting air pressure on adhesion strength of resin to titanium // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2016. Vol. 65. Pp. 41–46. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.11.003
18. *Li J., Li Y., Huang M., Xiang Y., Liao Y.* Improvement of aluminum lithium alloy adhesion performance based on sandblasting techniques // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2018. Vol. 84. Pp. 307–316. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2018.04.007
19. *Caravaca C., Flamant Q., Anglada M., Gremillard L., Chevalier J.* Impact of sandblasting on the mechanical properties and aging resistance of alumina and zirconia based ceramics // *Journal of the European Ceramic Society*. 2018. Vol. 38. Issue 3. Pp. 915–925. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.10.050
20. *Okada M., Taketa H., Torii Y, Irie M., Matsumoto T.* Optimal sandblasting conditions for conventional-type yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystals // *Dental Materials*. 2019. Vol. 35. Issue 1. Pp. 169–175. DOI: 10.1016/j.dental.2018.11.009
21. *Wang H., Zhu R., Lu Y., Xiao G., He K., Yuan Y. et al.* Effect of sandblasting intensity on microstructures and properties of pure titanium micro-arc oxidation coatings in an optimized composite technique // *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 292. Pp. 204–212. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.11.115
22. *Multigner M., Frutos E., Gonzalez-Carrasco J., Jimenez J., Marn P., Ibanez J.* Influence of the sandblasting on the subsurface microstructure of 316LVM stainless steel: implications on the magnetic and mechanical properties // *Materials Science and Engineering: C*. 2009. Vol. 29. Issue 4. Pp. 1357–1360. DOI: 10.1016/j.msec.2008.11.002
23. *Li X., Ye J., Zhang H., Feng T., Chen J., Hu X.* Sandblasting induced stress release and enhanced adhesion strength of diamond films deposited on austenite stainless steel // *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 412. Pp. 366–373. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.03.214
24. *Ho B., Tsoi J., Liu D., Lung C.Y. K., Wong H., Matinlinna J.P.* Effects of sandblasting distance and angles on resin cement bonding to zirconia and titanium // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2015. Vol. 62. Pp. 25–31. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.06.009
25. *Sorrentino L., Polini W., Bellini C., Parodo G.* Surface treatment of CFRP: influence on single lap joint performances // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2018. Vol. 85. Pp. 225–233. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2018.06.008
26. *Watanabe I., Kurtz K., Kabcenell J., Okabe T.* Effect of sandblasting and silicoating on bond strength of polymer-glass composite to cast titanium // *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 1999. Vol. 82. Issue 4. Pp. 462–467. DOI: 10.1016/s0022-3913(99)70035-1
27. *Vasilkin A., Akhmetzyanov R., Zubkov G., Vasilkin I.* Experimental determination of the tightening coefficient of bolts according to the DIN standard // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 389. P. 01080. DOI: 10.1051/e3sconf/202338901080
28. *Василькин А.А., Зубков Г.В., Прокаев С.А., Василькин И.А.* Размер площадки трения фрикционного болтового соединения // *Строительство: наука и образование*. 2024. Т. 14. № 1. С. 61–72. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.4. EDN NAXLLQ.
29. *Poorna Chander K., Vashista M., Sabiruddin K., Paul S., Bandyopadhyay P.P.* Effects of grit blasting on surface properties of steel substrates // *Materials & Design*. 2009. Vol. 30. Issue 8. Pp. 2895–2902. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.01.014
30. *Bechikh A., Klinkova O., Maalej Y., Tawfiq I., Nasri R.* Sandblasting parameter variation effect on galvanized steel surface chemical composition, roughness and free energy // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020. Vol. 102. P. 102653. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102653
31. *Momber A.W., Wong Y.C., Budidharm E.* Hydrodynamic profiling and grit blasting of low-carbon steel surfaces // *Tribology International*. 2002. Vol. 35. Issue 4. Pp. 271–281. DOI: 10.1016/s0301-679x(02)00009-9
32. *Чесноков А.С.* Сдвигоустойчивые соединения на высокопрочных болтах. М. : Стройиздат, 1974. 120 с.

Поступила в редакцию 19 декабря 2024 г.

Принята в доработанном виде 31 декабря 2024 г.

Одобрена для публикации 6 февраля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Андрей Александрович Василькин — кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 636406, Scopus: 57192557109, ORCID: 0000-0003-0962-527X; vasilkinaa@mgsu.ru;

Илья Андреевич Василькин — студент; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; editorfarnsworth@gmail.com.

Вклад авторов:

Василькин А.А. — научное руководство, концепция исследования, научное редактирование текста статьи.

Василькин И.А. — подготовка моделей, проведение эксперимента, обработка результатов эксперимента.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ivkovic B., Durdjanovic M., Stamenkovic D. The Influence of the contact surface roughness on the static friction coefficient. *Tribology in Industry*. 2000; 22(3-4):41-44.
2. Tusnin A.R., Tikhonov S.M., Alekhine V.N., Belyaeva Z.V., Kudryavtsev S.V., Rybakov V.A. et al. Design of metal structures. Part 1. Metal structures. *Materials and design principles: textbook for universities*. Moscow, Pero Publishing House, 2020; 468. EDN BQNCPS. (rus.).
3. Hogan T.J., Munter S.A. *Design Guide 1: Bolt-ing in Structural Steel Connections*. Australia, Australian Steel Institute, 2007.
4. Wang Y., Guan J., Zhang Y., Yang L. Experimental Research on Slip Factor in Bolted Connection with Stainless Steel. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*. 2013; 29(5):769-774.
5. Stranghöner N., Afzali N., de Vries P., Schedin E., Pilhagen J. Slip factors for slip-resistant connections made of stainless steel. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 152:235-245. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.07.005
6. Stranghöner N., Afzali N., de Vries P., Schedin E., Pilhagen J., Cardwell S. Slip-resistant bolted connections of stainless steel. *Steel Construction*. 2017; 10(4):333-343. DOI: 10.1002/stco.201710044
7. Zhang T., Bu Y., Wang Y., Chen Z., He W. Experimental Study on the Slip Behaviour of Stainless Steel High-Strength Bolted Connections with a New Surface Treatment. *Materials*. 2022; 15(16):5672. DOI: 10.3390/ma15165672
8. Cruz A., Simões R., Alves R. Slip factor in slip resistant joints with high strength steel. *Journal of Constructional Steel Research*. 2012; 70:280-288. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.11.001
9. Heistermann C., Veljkovic M., Simões R., Rebelo C., da Silva L.S. Design of slip resistant lap joints with long open slotted holes. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013; 82:223-233. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.11.012
10. Annan C.-D., Chiza A. Slip resistance of metalized-galvanized faying surfaces in steel bridge construction. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014; 95:211-219. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.12.008
11. Maiorana E., Zampieri P., Pellegrino C. Experimental tests on slip factor in friction joints: comparison between European and American Standards. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2017; 12(43):205-217. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.43.16
12. Chander K.P., Vashista M., Sabiruddin K., Paul S., Bandyopadhyay P.P. Effects of grit blasting on surface properties of steel substrates. *Materials & Design*. 2009; 30(8):2895-2902. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.01.014
13. Day J., Huang X., Richards N. Examination of a grit-blasting process for thermal spraying using statistical methods. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2005; 14(4):471-479. DOI: 10.1361/105996305x76469
14. Varacalle D.J., Guillen D.P., Deason D.M., Rhodaberger W., Sampson E. Effect of grit-blasting on substrate roughness and coating adhesion. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2006; 15(3):348-355. DOI: 10.1361/105996306x124347
15. Mohammadi Z., Ziaei-Moayyed A., Sheikh-Mehdi Mesgar A. Grit blasting of Ti-6Al-4V alloy: optimization and its effect on adhesion strength of plasma-sprayed hydroxyapatite coatings. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007; 194(1-3):15-23. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.03.119
16. Rudawska A., Danczak I., Maller M., Valasek P. The effect of sandblasting on surface properties for adhesion. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2016; 70:176-190. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2016.06.010

17. Khan A.A., Al Kheraif A.A., Alhijji S.M., Matinlinna J.P. Effect of grit-blasting air pressure on adhesion strength of resin to titanium. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2016; 65:41-46. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.11.003
18. Li J., Li Y., Huang M., Xiang Y., Liao Y. Improvement of aluminum lithium alloy adhesion performance based on sandblasting techniques. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2018; 84:307-316. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2018.04.007
19. Caravaca C., Flamant Q., Anglada M., Gremillard L., Chevalier J. Impact of sandblasting on the mechanical properties and aging resistance of alumina and zirconia based ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 2018; 38(3):915-925. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.10.050
20. Okada M., Taketa H., Torii Y., Irie M., Matsuoto T. Optimal sandblasting conditions for conventional-type yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystals. *Dental Materials*. 2019; 35(1):169-175. DOI: 10.1016/j.dental.2018.11.009
21. Wang H., Zhu R., Lu Y., Xiao G., He K., Yuan Y. et al. Effect of sandblasting intensity on microstructures and properties of pure titanium micro-arc oxidation coatings in an optimized composite technique. *Applied Surface Science*. 2014; 292:204-212. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.11.115
22. Multigner M., Frutos E., Gonzalez-Carrasco J., Jimenez J., Marn P., Ibanez J. Influence of the sandblasting on the subsurface microstructure of 316LVM stainless steel: implications on the magnetic and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: C*. 2009; 29(4):1357-1360. DOI: 10.1016/j.msec.2008.11.002
23. Li X., Ye J., Zhang H., Feng T., Chen J., Hu X. Sandblasting induced stress release and enhanced adhesion strength of diamond films deposited on austenite stainless steel. *Applied Surface Science*. 2017; 412:366-373. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.03.214
24. Ho B., Tsoi J., Liu D., Lung C.Y. K., Wong H., Matinlinna J.P. Effects of sandblasting distance and angles on resin cement bonding to zirconia and titanium. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2015; 62:25-31. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.06.009
25. Sorrentino L., Polini W., Bellini C., Parodo G. Surface treatment of CFRP: influence on single lap joint performances. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2018; 85:225-233. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2018.06.008
26. Watanabe I., Kurtz K., Kabcenell J., Okabe T. Effect of sandblasting and silicoating on bond strength of polymer-glass composite to cast titanium. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 1999; 82(4):462-467. DOI: 10.1016/s0022-3913(99)70035-1
27. Vasilkin A., Akhmetzyanov R., Zubkov G., Vasilkin I. Experimental determination of the tightening coefficient of bolts according to the DIN standard. *E3S Web of Conferences*. 2021; 389:01080. DOI: 10.1051/e3sconf/202338901080
28. Vasilkin A.A., Zubkov G.V., Prokaev S.A., Vasilkin I.A. Friction area size of the friction bolted connection. *Construction: Science and Education*. 2024; 14(1):61-72. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.4. EDN NAXLLQ. (rus.).
29. Poorna Chander K., Vashista M., Sabiruddin K., Paul S., Bandyopadhyay P.P. Effects of grit blasting on surface properties of steel substrates. *Materials & Design*. 2009; 30(8):2895-2902. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.01.014
30. Bechikh A., Klinkova O., Maalej Y., Tawfiq I., Nasri R. Sandblasting parameter variation effect on galvanized steel surface chemical composition, roughness and free energy. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020; 102:102653. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102653
31. Momber A.W., Wong Y.C., Budidharm E. Hydrodynamic profiling and grit blasting of low-carbon steel surfaces. *Tribology International*. 2002; 35(4):271-281. DOI: 10.1016/s0301-679x(02)00009-9
32. Chesnokov A.S., Knyazhev A.F. *Shear-resistant joints with high-strength bolts*. Moscow, Stroyizdat, 1974; 120. (rus.).

Received December 19, 2024.

Adopted in revised form on December 31, 2024.

Approved for publication on February 6, 2025.

B I O N O T E S : **Andrey A. Vasil'kin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 636406, Scopus: 57192557109, ORCID: 0000-0003-0962-527X; vasilkinaa@mgsu.ru;

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

Contribution of the authors:

Andrey A. Vasil'kin — scientific guidance, scientific editing of the text of the article.

Ilya A. Vasilkin — preparation of models, conducting an experiment, processing the results of the experiment.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Использование натурального пуццолана в качестве улучшения портландцемента для производства бетона с экологическими свойствами («зеленый» бетон)

Мустафа Али Вассуф, Джамал Юнес Омран, Али Хейрбек

Университета Тишрин; г. Латакия, Сирия

АННОТАЦИЯ

Введение. Строительная отрасль считается одной из основных причин ухудшения состояния окружающей среды из-за использования традиционных строительных материалов, таких как цемент. В результате возникает острая необходимость в разработке устойчивых альтернатив производству экологически чистого бетона с применением натуральных необработанных материалов. Признавая важность цемента для урбанизации человечества, следует отметить, что его широкое использование, несомненно, способствует глобальному потеплению, которое угрожает окружающей среде во всем мире из-за выбросов углекислого газа, когда ископаемое топливо применяется для расплавления продуктов, которые используются при его производстве, и представляют собой смесь глины, воды и извести для получения основного связующего материала, т.е. клинкера.

Материалы и методы. Цель исследования — изучение возможности замены портландцемента натуральным пуццоланом в соответствии с соотношениями замены в диапазоне от 10 до 50 %, а также изучение влияния этой замены на физические свойства, наиболее важными из которых являются теплопроводность и механические свойства, представленные сопротивлением простому давлению, с учетом следующих факторов: использование переработанного гравия в качестве альтернативы натуральному гравию.

Результаты. Результаты показали, что при увеличении процентного содержания замены цемента пуццоланом повышается термостойкость бетона, так как замена цемента равной массой пуццолана приводит к снижению теплопроводности на 5 %. Кроме того, переработанные заполнители обладают большей термостойкостью по сравнению с натуральными заполнителями, даже если 50 % цемента заменено молотым пуццоланом. Отмечается увеличение стойкости более чем на 24 %, а снижение стойкости полученного бетона к простому давлению допустимо, если замена на пуццолан составляет менее 50 %.

Выводы. Простые значения прочности при сжатии кубических образцов превышают минимальные пределы международных спецификаций на цементные блоки, что позволяет изготавливать цементные блоки с использованием вторичных заполнителей с возможностью замены цемента молотым пуццоланом в соответствии с различными коэффициентами замещения до 50 %.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экологически чистые материалы, натуральный пуццолан, переработанная галька, теплопроводность, прочность при сжатии, обрабатываемость бетона, термическое сопротивление

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Вассуф М.А., Омран Д.Ю., Хейрбек А. Использование натурального пуццолана в качестве улучшения портландцемента для производства бетона с экологическими свойствами («зеленый» бетон) // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 4. С. 529–544. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.529-544

Автор, ответственный за переписку: Мустафа Али Вассуф, moustafa.wassouf@tishreen.edu.sy.

Using natural pozzolana as an improvement of Portland cement to manufacture concrete with environmental properties (Green Concrete)

Moustafa Ali Wassouf, Jamal Younes Omran, Ali Kheirbek

Tishreen University; Latakia, Syria

ABSTRACT

Introduction. The construction industry is considered as one of the major causes of environmental degradation due to the use of traditional building materials such as cement. As a result, there is an urgent need to develop sustainable alternatives to produce eco-friendly concrete using natural unprocessed materials. While acknowledging the importance of cement in the urbanization of mankind, it should be noted that its widespread use undoubtedly contributes to global warming which threatens the environment worldwide due to carbon dioxide emissions when fossil fuels are used to melt the products used in its manufacture, which are a mixture of clay, water and lime to produce the main binding material i.e. clinker.

Materials and methods. The aim of the study is to investigate the possibility of replacing Portland cement with natural pozzolana according to replacement ratios ranging from 10 to 50 %, and to study the effect of this replacement on physical

properties, the most important of which are thermal conductivity and mechanical properties represented by the resistance to simple pressure, taking into account the following factors: the use of recycled gravel as an alternative to natural gravel.

Results. The results showed that increasing the percentage of cement replacement with pozzolana increases the thermal resistance of concrete, since replacing cement with an equal mass of pozzolana results in a 5 % reduction in thermal conductivity. In addition, recycled aggregates have higher thermal resistance compared to natural aggregates even when 50 % of cement is replaced by ground pozzolan. An increase in resistance of more than 24 % is observed, and a decrease in the simple pressure resistance of the resulting concrete is acceptable if the replacement with pozzolana is less than 50 %.

Conclusions. The simple compressive strength values of cubic specimens exceed the minimum limits of international specifications for cement blocks, which allows the manufacture of cement blocks using secondary aggregates with the possibility of replacing cement with ground pozzolana according to different replacement ratios up to 50 %.

KEYWORDS: sustainable materials, natural pozzolana, recycled pebbles, thermal conductivity, resistance to simple pressure, workability of concrete, thermal resistance

FOR CITATION: Wassouf M.A., Omran Ja.Yo., Kheirbek A. Using natural pozzolana as an improvement of Portland cement to manufacture concrete with environmental properties (Green Concrete). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(4):529-544. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.529-544 (rus.).

Corresponding author: Moustafa Ali Wassouf, moustafa.wassouf@tishreen.edu.sy.

ВВЕДЕНИЕ

Бетон, изготовленный из портландцемента, используется во всем мире как строительный материал более 150 лет. Однако цементный раствор и бетон имеют значительные недостатки, такие как низкая прочность при изгибе, медленная скорость отверждения, большое трещинообразование при высыхании и низкая химическая стойкость. Для преодоления этих недостатков применяются разнообразные добавки [1].

Портландцемент изготавливают путем измельчения клинкера с гипсом. Клинкер получают путем кальцинирования и сжигания группы сырьевых материалов — это известняк, оксид железа, суглинок и песок. Таким образом, процесс производства клинкера — более топливозатратный, отличается большим выбросом углерода, что оказывает воздействие на окружающую среду. Чем меньше цементная промышленность сможет использовать клинкер, тем она будет более экологичной, заменив его экологически чистым сырьем.

Пуццолановые материалы представляют собой широкую категорию кремнистых и глиноземистых материалов (материалов, содержащих кремнезем и оксид алюминия), которые не являются цементирующими материалами, но при реакции с гидроксидом кальция в присутствии воды могут образовывать соединения с цементирующими свойствами. Пуццолан — один из встречающихся в природе видов вулканического туфа. Некоторые из пуццоланов промышленные, например летучая зола, образующаяся при сжигании угля на электростанциях [2].

Настоящее исследование посвящено изучению замены портландцемента молотым пуццоланом в соответствии с различными коэффициентами в пределах 10, 30 и 50 %. Отмечаются физические свойства (теплопроводность) и механические (стойкость к простому давлению) производимого бетона с целью уменьшения воздействия на окружающую среду и снижения экономических затрат.

Экологичные строительные материалы

Экологичные строительные материалы используются в строительных проектах и уменьшают его

воздействие на окружающую среду, а также помогают улучшить качество жизни людей, живущих на объекте или в здании, способствуют расширению применения энергии и природных ресурсов и сокращению выбросов углекислого газа [3]. Этим материалам в последние годы уделяется большое внимание, поскольку их часто добывают из возобновляемых ресурсов. Экологичные строительные материалы помогают застройщикам и подрядным компаниям реализовывать высококачественные проекты, которые достигают целей устойчивого развития и сохраняют окружающую среду за счет сокращения выбросов углекислого газа, помимо экономии затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание в долгосрочной перспективе. Материалы играют решающую роль на протяжении всего срока службы любого изделия [4]. Однако его производство сопряжено с множеством проблем, поскольку традиционные производственные процессы ответственны за увеличение выбросов углекислого газа, что приводит к растущей обеспокоенности по поводу глобального потепления [5].

Многие исследования доказали, что традиционные строительные материалы, используемые в строительных элементах, таких как крыши и стены, служат основной причиной повышенных тепловых нагрузок (отопление и кондиционирование воздуха) из-за их низкой термической устойчивости к атмосферным воздействиям [6]. В табл. 1 представлено сравнение традиционных и экологически чистых строительных материалов.

Натуральный пуццолан

Пуццоланы представляют собой широкий класс кремнистых и глиноземистых материалов, которые обладают небольшой цементирующей ценностью или не имеют ее, но в мелкодисперсной форме и в присутствии воды химически реагируют с гидроксидом кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). При нормальных условиях и при комнатной температуре образуют соединения с цементирующими свойствами.

Они бывают двух типов:

1. Натуральный, возобновляемый пуццолан, полученный из вулканического пепла.

Табл. 1. Сравнение экологически чистых и традиционных строительных материалов [3, 7]

Table 1. Comparison of environmentally friendly and traditional building materials [3, 7]

Традиционные строительные материалы Traditional Building Materials	Экологичные строительные материалы Green Building Materials	Строительные материалы, характеристики и производство Building materials, characteristics and production
Глина, гипс, гранит Clay, gypsum, granite	Хвосты, летучая зола, отходы промышленности, сельскохозяйственные отходы Tailings, fly ash, waste industrial, agricultural waste	Композиция Composition
Цемент, глиняный кирпич, деревянная доска Cement, clay brick, wood board	Алюминиевый сплав, «зеленый» бетон, углеродное волокно, зеленое вакуумное стекло Aluminum alloy, green concrete, carbon fibre, green vacuum glass	Материал Material
Единственная функция, низкая температура воспламенения, легко поддается формованию Single function, low ignition point, easy to mold	Теплоизоляция, влагостойкость, огнестойкость Thermal insulation, moisture resistance, fire retardant	Представление Performance
Подвержен образованию большого количества утечек Prone to a large number of leaks	Работа с низким энергопотреблением, экологически чистое производство Low power consumption operation, clean production	Производство Production

2. Промышленный пуццолан, изготовленный из:

- заводских отходов, таких как угольная зола (летучая зола), образующаяся в результате сжигания угля на электростанциях;

- железного шлака, образующегося из отходов металлургического завода (шлак доменной печи).

Природные пуццоланы можно разделить на две категории материалов: вулканического происхождения и осадочного происхождения [8], поскольку в Сирии нет дополнительных связующих искусственного происхождения. Однако страна богата природными ресурсами, здесь много природных пуццолановых рудников, объем которых оценивается примерно в 1 млрд т. По данным Генеральной корпорации геологии и минеральных ресурсов, ежегодное производство цемента в Сирии составляет около 6 млн т. На рис. 1 показаны натуральные зерна с участка Телль-Шихан. В будущем ожидается значительное



Рис. 1. Изображение натуральных зерен пуццолана с месторождения Телль-Шихан [9]

Fig. 1. Image of natural pozzolana grains from the Tell Shihan deposit [9]

увеличение этого количества в связи с этапом восстановления, а поскольку Сирия является страной с низким уровнем дохода, предпринимается много попыток найти более экономичные методы. Один из таких методов — использование натуральных добавок для снижения себестоимости производства цемента. Сирийские заводы в настоящее время добавляют большое количество натурального пуццолана (~25 %) в первую цементную смесь для производства цемента с добавками СЕМ II.

Природный пуццолан встречается в Сирии на участке Телль-Шихан, расположенном примерно в 70 км к юго-востоку от Дамаска и в 15 км к северозападу от провинции Ас-Сувайда, покрытым Харрат аль-Шам, представляющим собой вулканическое поле площадью около 45 000 км², охватывающим часть Иордании и Королевства Саудовская Аравия. Таким образом, природный пуццолан, обнаруженный на стоянке Телль-Шихан, имеет вулканическое происхождение. Основные оксиды, образующие натуральный пуццолан: SiO₂ — 44,9 %, Al₂O₃ — 16,5 %, Fe₂O₃ — 8,9 %, CaO — 9,6 %, MgO — 8,4 %, оксиды щелочных металлов — 4,4 %. Минеральный анализ природного пуццолана проведен с применением технологии дифракции рентгеновских лучей [9, 10]. На рис. 2 показаны результаты анализа природного пуццолана, на рис. 3 — с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) представлены зерна натурального пуццолана, демонстрирующие их везикулярную структуру.

Из рис. 2 видно, что пуццолан содержит оксиды железа (Fe₂O₃ — 16,5 %), диоксид кремния (SiO₂ — 44,9 %) и оксиды алюминия (Al₂O₃ — 17,5 %). Общее содержание этих оксидов составляет более 70 %, и поэтому оно соответствует требованиям ASTM C618.

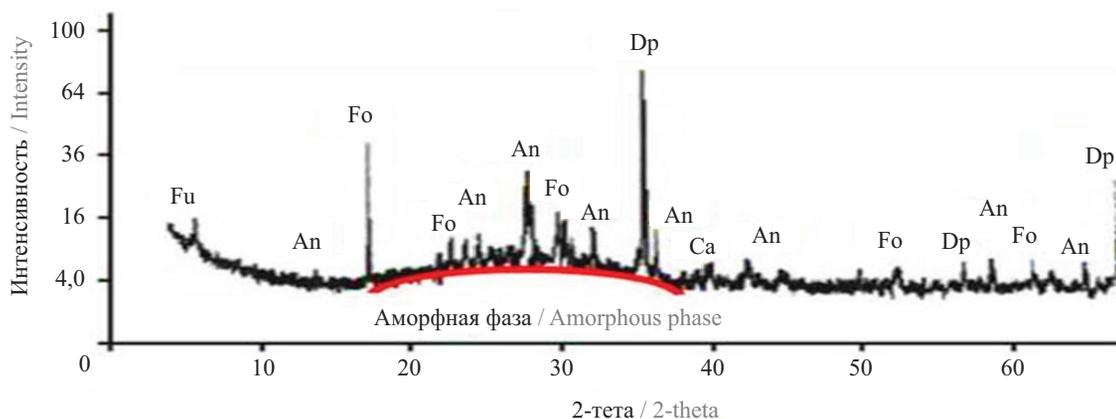


Рис. 2. Рентгеновский анализ натурального пуццолана с указанием минералов [9]

Fig. 2. X-ray analysis of natural pozzolana showing minerals [9]

В табл. 2 показано, как измельченный пуццолан можно использовать в бетоне.

Применение натурального пуццолана снижает выбросы углекислого газа, связанные с производством портландцемента, поскольку замена 50 % портландцемента натуральным пуццоланом означает сокращение выбросов парниковых газов при производстве цемента вдвое [11]. Предыдущие исследования продемонстрировали важность использования натурального пуццолана в качестве заменителя кремнистого песка при производстве легкого цементного раствора с сопротивлением простому давлению в диапазоне 170–400 кг/см² и меньшей плотностью 1920 кг/м³. Результаты показали, что применение натурального пуццолана обладает рядом преимуществ, наиболее важным из которых является снижение плотности раствора и последующее получение легкого раствора, который можно использовать в конструктивных элементах, когда его сопротивление простому давлению превышает 170 кг/см² [12].

Мусорные отходы

Строительные отходы определяются как неопасные твердые отходы, образующиеся в результате сноса, строительства, реконструкции и сноса сооружений и зданий. К полученным материалам относятся: бетон, блоки, дерево, стекло, железо, алюминий и другие материалы. Принцип переработки основан на сокращении использования новых ресурсов при строительстве зданий, которые проектировались таким образом, чтобы в конце своего срока службы они были источником и ресурсом для других зданий.

Деятельность по строительству, сносу и реконструкции приводит к образованию большого количества отходов, которые вредны для окружающей среды и могут оказать существенное влияние на глобальное потепление, если не управлять ими должным образом [13]. По оценкам, около 35 % отходов строительства и сноса попадает на свалки без какой-либо переработки [14]. Поэтому необходимы новые решения, технологии и методы управления ущерб-

Табл. 2. Использование измельченного пуццолана в бетоне согласно требованиям к химическому составу стандарта ASTM C618

Table 2. Use of pulverized pozzolana in concrete according to ASTM C618 chemical composition requirements

Химический состав Chemical composition	Класс / Class		
	N	F	C
(SiO ₂)(Al ₂ O ₃)(Fe ₂ O ₃), min, %	Сырые или кальцинированные натуральные пуццоланы Raw or calcined natural pozzolans	Летучая зола. Этот класс летучей золы обладает пуццолановыми свойствами Fly ash. This class of fly ash has pozzolanic properties	Летучая зола, помимо пуццолановых свойств, также обладает некоторыми цементирующими свойствами Fly ash, besides pozzolanic properties, also has some cementitious properties
	70	50	50

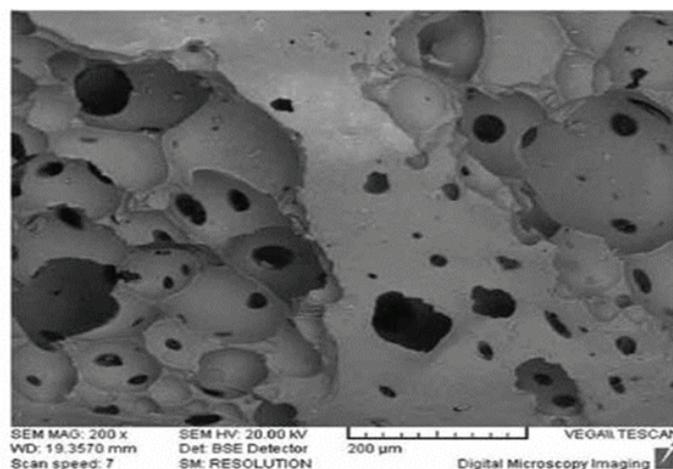


Рис. 3. Изображение зерен натурального пуццолана в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ), показывающее их везикулярную структуру [9]

Fig. 3. Scanning electron microscope (SEM) image of natural pozzolana grains showing their vesicular structure [9]

бом от отходов. Европейская комиссия предложила к 2020 г. перерабатывать не менее 70 % отходов строительства и сноса. Однако в некоторых государствах-членах ЕС уровень переработки уже превысил 70 %, и это достигнуто за счет передовой практики управления отходами, в основном применяющей принципы переработки в строительном секторе [15].

Основным преимуществом использования бытовых материалов является сохранение ресурсов и энергии, которого можно достичь за счет сокращения производства новых материалов (Агентство по охране окружающей среды США). На рис. 4 приведены некоторые образцы строительного мусора и отходов сноса, а также другие материалы. Большой процент из них можно переработать и использовать, но это непростая задача. Их можно подвергнуть обработке (дробление, молотье, измельчение, сглаживание, фильтра-

ция), чтобы они затем были пригодны для повторного использования в строительных работах, таких как, например, дороги (фундаментные слои, обратная засыпка, слои осадки). Применение щебня зданий и сооружений, состоящего из конструктивных бетонных компонентов и цементных блоков, представляет собой альтернативный материал для производства мягкого окатанного гравия, используемого при приготовлении бетонных смесей, поскольку считается, что это важный элемент достижения устойчивого развития за счет сохранения природных ресурсов, так как молотые цементные блоки могут использоваться в качестве мягких материалов для производства бетонных смесей с применением менее важных конструктивных элементов в зависимости от требуемой устойчивости к давлению в размере, не превышающем 65 % [16].

Наиболее актуальна проблема утилизации строительных отходов для районов недавних боевых действий [18]. Применение отходов промышленности в качестве заполнителей в бетон позволяют решить проблему утилизации этих отходов и одновременно снизить объемы добычи природных каменных материалов, и, как следствие, уменьшить нагрузку на окружающую среду [19, 20].

Цель исследования — изучение замены портландцемента молотым пуццоланом в соответствии с различными коэффициентами замены в пределах 10, 30 и 50 % и его влиянием на физико-механические свойства бетона.

Задачи исследования:

1. Исследование свойств полученного свежего бетона по показателям теплопроводности и устойчивости к простому давлению и сравнение этих результатов с традиционным бетоном.

2. Изучение характера взаимосвязи между переработанными заполнителями и натуральным пуццоланом, используемым для улучшения портландцемента.



Рис. 4. Некоторые образцы отходов строительства и сноса зданий [17]

Fig. 4. Some specimens of construction and demolition waste [17]

В России пуццолан также широко применяется в строительстве, особенно при возведении зданий и сооружений в условиях высоких нагрузок, например в мостостроении, тоннелях, гидротехнических сооружениях и т.д. Пуццолан позволяет улучшить качество бетона, увеличить его срок службы и снизить затраты на строительство. Таким образом, использование пуццоланов является актуальным и для Сирии, и для России, и применяется в различных областях строительства для улучшения качества и надежности строительных материалов.

Использование этих альтернативных материалов не только помогает снизить выбросы углерода, но также способствует сохранению невозобновляемых ресурсов. Переход к более устойчивым практикам может иметь положительное влияние на строительную индустрию в России путем стимулирования экологически чистых методов и снижения затрат. В целом внедрение устойчивых практик в строительную индустрию в России может привести к более экологически чистому и экономически выгодному будущему.

Использование экологически чистых материалов имеет решающее значение для снижения воздействия строительства на окружающую среду и продвижения более устойчивого будущего. Однако доступность и стоимость этих материалов часто является проблемой. Поэтому основное внимание уделяется материалам из местных источников, таких как пуццолан и бутовый гравий, которые можно применять в строительных элементах, что способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду и сокращению затрат на строительство без изменения характеристик строительных элементов. Следует отметить важность использования натурального пуццолана и вторичного гравия при производстве экологически чистого бетона, чтобы снизить зависимость от цемента. Заменяя половину цемента натуральным пуццоланом и используя вторичный

гравий, строительные проекты в России могут стать более экологически устойчивыми.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследованиях принята экспериментальная методика изучения природного пуццолана, щебня и образцов бетона, изготовленных из вторичного сырья, а также аналитическая и математическая методика исследования изменения механических и физических показателей при темпах замены портландцемента молотым пуццоланом и натурального гравия переработанным гравием.

Для этого образцы бетонов всех смесей подвергались физико-механическим испытаниям на образцах кубической формы с размерами (10 × 10 × 10 см). Испытание на теплопроводность проводилось путем прямого воздействия тепла на образцы бетона. Спроектирована тепловая камера, изолированная теплоплитками, размерами 10 × 10 см и высотой 20 см. Она оснащена источником тепла снизу и пустым верхом для испытуемого образца. Форма камеры и источника тепла позволяет нагревать образец только с одной стороны, чтобы измерить передачу тепла с этой стороны на другую через определенный период времени. Затем выполнено простое испытание на устойчивость к сжатию кубических образцов в возрасте 28 сут.

Из одного из зданий, пострадавших в результате землетрясения 6 февраля в Латакии, было вывезено достаточное количество щебня для разборки, чтобы обработать его в лаборатории, прежде чем охарактеризовать и использовать в процессе изготовления лабораторных образцов.

В табл. 3 приведены результаты измерения видимого и твердого объемного веса, а также процентного содержания пропитки натуральной гальки и переработанной гальки, используемой при изготовлении битумных кубических моделей.

Табл. 3. Результаты определения видимой и твердой объемной массы различных камней

Table 3. Results of visible and solid volume weight of different stones

Впитывание, % Absorption, %	Твердая объемная масса, кг/л Solid volumetric mass, kg/l	Виртуальная объемная масса, кг/л Virtual volumetric mass, kg/l	Образец Specimen
9	2,280	1,274	Переработанный гравий Recycled gravel
3,3	2,74	1,439	Натуральный гравий Natural gravel
–	2,55	1,338	Мелкий песок Fine sand
–	2,68	1,570	Крупный песок Coarse sand

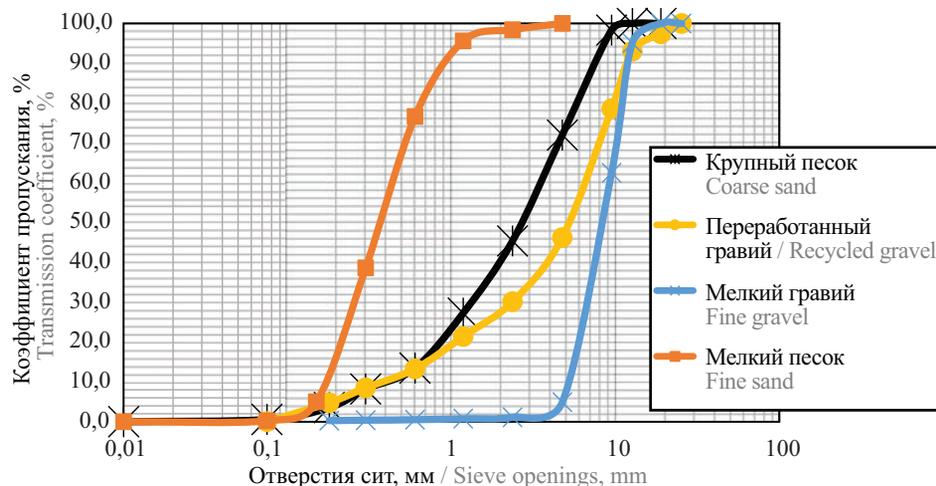


Рис. 5. Кривая градиента зернистости для тестируемой гальки

Fig. 5. Grain gradient curve for the tested pebbles

Эквивалентные значения песка для двух типов используемого песка составили 85 % для мелкого кремнистого песка, добытого в Набеке, и 68 % для крупного известнякового песка. При заливке бетона применялся обычный портландцемент марки 1 и марки 32,5 производства Тартуского завода.

Состав бетонных смесей

Для приготовления лабораторных моделей сырого бетона смесь необходимо было проектировать на основе результатов градации зерен натуральных и переработанных заполнителей. Применен французский метод расчета (Дре-Горисс). Ниже показаны этапы составления этих смесей и конечные пропорции, полученные для различных смесей.

Утверждено 8 бетонных смесей, разделенных на две группы с разными коэффициентами замены каждого из заполнителей (природного и вторсырья), кроме замены цемента молотым пуццоланом в следующих массовых соотношениях 10, 30, 50 %. Под вторичным заполнителем подразумевается смесь компонентов из щебня, приготовленная в следующем весовом соотношении: 60 % бетона, 10 % плитки,

20 % блоков, 10 % керамики. На рис. 5 представлены кривые градации зерен гравия, используемого в бетонных смесях.

В каждой группе смесей фиксировали соотношение воды и цемента (В/Ц) для предотвращения взаимного влияния параметров, влияющих на свойства получаемого бетона. Было принято соотношение В/Ц = 0,6, а также коэффициент качества гравия (Γ) = 0,35, который связан с максимальным диаметром гравия. $\Gamma = 0,35$ — хороший показатель, объем воздуха 10 л/м³.

Состав некоторых из этих смесей:

- смесь (NC) состоит из 100 % портландцемента и природного гравия;
- смесь (GCP 50 %) состоит из 50 % портландцемента, 50 % пуццолана и природного гравия;
- смесь (NCR) состоит из 100 % портландцемента и 100 % переработанных заполнителей;
- смесь (GCRP 50 %) состоит из 50 % портландцемента, 50 % пуццолана и 100 % переработанного гравия.

В табл. 4, 5 приведены результаты проектирования бетонных смесей.

Табл. 4. Результаты разработки смесей для первой группы для 1 м³

Table 4. Mixture development results for the first group for 1 m³

Компоненты смеси, кг/м ³ Mixture components, kg/m ³	Смеси первой группы Mixtures of the first group			
	NC	GCP _{10%}	GCP _{30%}	GCP _{50%}
Обычные камни среднего размера Normal average stones	994	994	994	994
Мелкий песок Fine sand	375	375	375	375
Линзовидный крупный песок Lenticular coarse sand	375	375	375	375

Компоненты смеси, кг/м ³ Mixture components, kg/m ³	Смеси первой группы Mixtures of the first group			
	NC	GCP _{10%}	GCP _{30%}	GCP _{50%}
Пуццолан Pozzolana	0	35	105	175
Цемент Cement	350	315	245	175
Вода Water	210	210	210	210

Табл. 5. Результаты разработки смесей для второй группы для 1 м³

Table 5. Mixture development results for the second group for 1 m³

Компоненты смеси, кг/м ³ Mixture components, kg/m ³	Смеси второй группы Mixtures of the second group			
	NCR	GCR _{p10%}	GCR _{p30%}	GCR _{p50%}
Мелкий песок Fine sand	375	375	375	375
Линзовидный крупный песок Lenticular coarse sand	375	375	375	375
Пуццолан Pozzolana	0	35	105	175
Цемент Cement	350	315	245	175
Вода Water	210	210	210	210
Переработанный гравий Recycled gravel	994	994	994	994

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже приведены результаты, полученные после проведения физико-механических испытаний кубических образцов размерами (10 × 10 × 10 см) с различными коэффициентами замены.

Физические свойства мягкого бетона

Эти характеристики включали в себя как кажущийся объемный вес, так и посадку с использованием специального измерительного конуса, называемого конусом Абрамса, для определения обрабатываемости бетона, его прочности и процентного содержания воды, добавляемой к цементу. Подходящая текстура (посадка) варьируется в зависимости от места установки. В табл. 6 показаны измеренные значения осадки для различных смесей, а также объемный вес свежего бетона.

Определение удобоукладываемости бетонной смеси

Удобоукладываемость бетонной смеси оценивают показателями подвижности или жесткости. Подвижность бетонной смеси оценивают по осадке (ОК) или распылу (РК) конуса, отформованного из бетонной смеси. Для этого используют конус Абрамса, загрузочную воронку, стальную линейку, кельму, гладкий лист металла и прямой металлический стержень диаметром 16 мм с округленными концами. С целью

определения подвижности бетонной смеси с зернами заполнителя наибольшей крупностью (до 40 мм включительно) применяют нормальный конус, а с зернами наибольшей крупностью более 40 мм — увеличенный. При подготовке конуса и приспособлений к испытаниям все соприкасающиеся с бетоном поверхности очищают и увлажняют.

Конус устанавливают на гладкий горизонтальный металлический лист и заполняют его бетонной смесью марок П1, П2 или П3 через воронку в три слоя одинаковой высоты. Каждый слой на его высоту уплотняют штыкованием металлическим стержнем, в нормальном конусе — 25 раз, в увеличенном — 56 раз. Бетонной смесью марок П4 и П5 конус заполняют в один прием и штыкуют 10 раз на всю высоту конуса.

Осадку конуса бетонной смеси определяют, укладывая гладкий стержень на верх формы и измеряя расстояние от нижней поверхности стержня до верха бетонной смеси с погрешностью не более 0,5 см (рис. 6).

Из результатов видно, что по мере увеличения процентного содержания цемента, замененного пуццоланом, удобоукладываемость бетона снижается, поскольку замена цемента пуццоланом равной массы увеличивает объем и плотность цемента выше,

Табл. 6. Результаты измерения осадки по Абрамсу и объемного веса свежего бетона

Table 6. Results of Abrams slump and volumetric weight measurements of fresh concrete

Смесь The mixture	Посадка «Абрамса», см Abrams landing gear, cm	Кажущийся объемный вес, кг/м ³ Apparent volumetric, kg/m ³
NC	16	2277
GCP _{10%}	15	2247
GCP _{30%}	14,5	2215
GCP _{50%}	13	2207
NCR	5	1675
GCR _{P10%}	4	1645
GCR _{P30%}	2,5	1625
GCR _{P50%}	1	1610



a

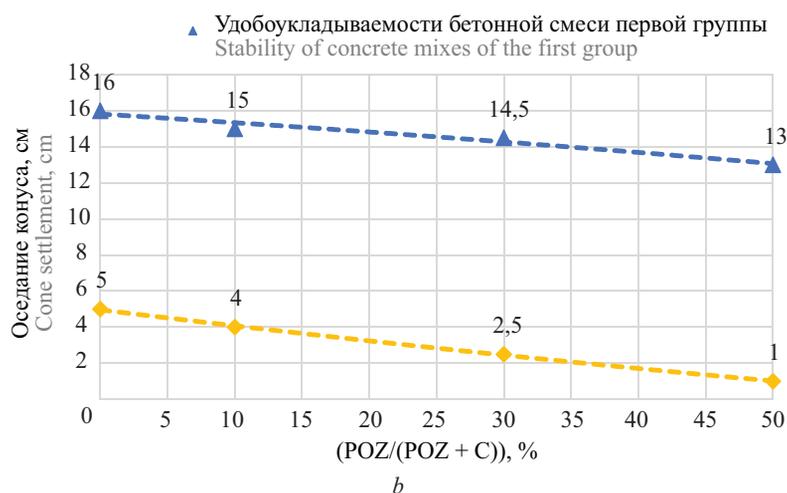


Рис. 6. Метод осадки конуса бетонной смеси (a); изменение текстуры, представленное спадом в зависимости от коэффициента замещения (b)

Fig. 6. Cone settlement method of concrete mix (a); texture variation represented by the decline as a function of the replacement ratio (b)

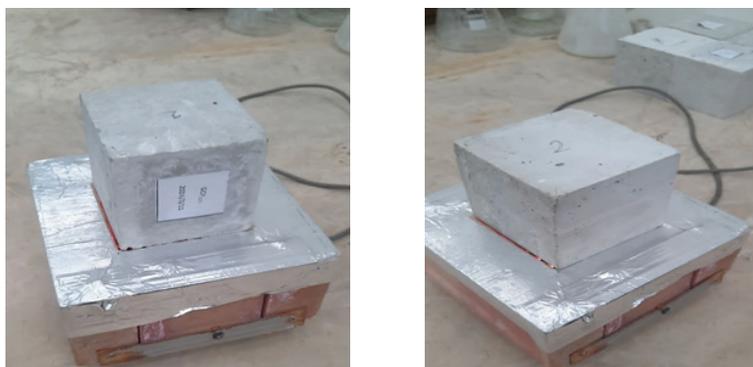


Рис. 7. Механизм измерения теплопроводности бетонных образцов

Fig. 7. Mechanism for measuring the thermal conductivity of concrete specimens

чем у пущолоана. На рис. 6 показано серьезное воздействие на текстуру бетона, когда его натуральная галька заменяется округлой галькой и водоцементное соотношение В/Ц установлено 0,6, так как образцы перемещаются из сегмента мягкой текстуры осадка = 4 см к сегменту жесткой текстуры, спад <4 см при коэффициенте замены 30 %.

Это связано с природой переработанных заполнителей и их относительной водоемкостью по сравнению с природными заполнителями, о чем свидетельствуют значения впитывания этих отдельных заполнителей, потому что их впитывание значительно превышает впитывание природных заполнителей, что создает проблему, связанную с эксплуатацией данного бетона, избежать которой можно путем добавления пластификатора для получения прочного слоя, учитывая, что не следует увеличивать дозу сверх допустимого предела, чтобы не замедлить затвердевание бетона.

Изменение термического сопротивления в зависимости от коэффициента замены

Формы камеры и источника тепла позволяли нагревать образец только с одной стороны, чтобы через

некоторое время измерить передачу тепла с этой стороны на другую. На рис. 7 показан механизм измерения теплопроводности образцов бетона.

Грани испытываемых кубических образцов были пронумерованы так, что одна сторона имела номер 1 (подвергалась нагреву), а противоположная сторона — номер 2 (воздействовала на внешнюю среду). Образцы подвергались нагреву в течение одного и того же периода и температуры, измерялись с обеих сторон с помощью лазерного термометра, как показано на рис. 8, 9.

Количество переданной тепловой энергии Q рассчитывалось по следующему уравнению. На рис. 10 показан механизм теплопередачи в твердых телах:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где m — масса, кг; c — удельная теплоемкость, Дж/кг·°C; ΔT — изменение температуры, °C.

Рассчитан коэффициент теплопроводности для бетонных кубов, который определяется как количество теплового тока, проходящего перпендикулярно поверхности материала площадью 1 м² и толщиной 1 м за счет разницы температур. Между двумя его поверх-



Рис. 8. Измерение разности температур для первой группы смесей (GCP 30 %)

Fig. 8. Temperature difference measurement for the first group of mixtures (GCP 30 %)



Рис. 9. Измерение разности температур для первой группы смесей (GCP 50 %)

Fig. 9. Temperature difference measurements for the first group of mixtures (GCP 50 %)

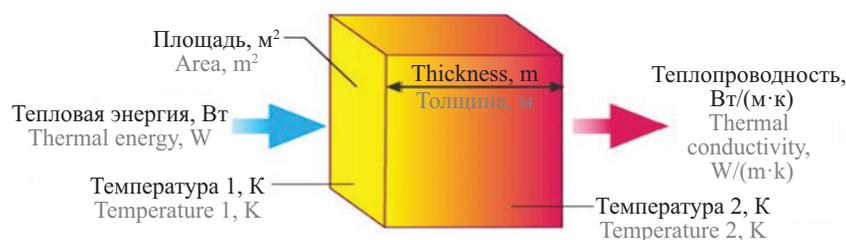


Рис. 10. Механизм теплопередачи в твердых телах

Fig. 10. Mechanism of heat transfer in solids

ностями коэффициент составляет 1° и определяется следующим соотношением:

$$\lambda = \frac{QL}{A\Delta T}, \quad (2)$$

где Q — количество тепла, передаваемое через материал, Вт; L — толщина, м; A — площадь, m^2 ; ΔT — изменение температуры, $^\circ C$.

Тепловое сопротивление R — это сопротивление, которое элемент конструкции оказывает передаче тепла за счет проводимости через свою толщину. По мере увеличения этого сопротивления способность элемента конструкции сопротивляться теплу увеличивается. Эта величина также называется теплоизоляцией и рассчитывается по соотношению:

$$R = 1/\lambda. \quad (3)$$

В табл. 7 приведены результаты измерений теплопроводности и термостойкости бетонных смесей.

На рис. 11 представлено изменение теплового сопротивления в зависимости от коэффициента замещения.

Из результатов видно, что с увеличением процента замены цемента пуццоланом термическое сопротивление бетона увеличивается, так как замена цемента равным по массе пуццоланом приводит к снижению теплопроводности на 5 %, а перерабо-

танные заполнители демонстрируют большую термическую стойкость по сравнению с натуральными заполнителями даже при замене 50 % цемента молотым пуццоланом. Отмечается увеличение прочности более чем на 24 %.

Прочность при сжатии в зависимости от коэффициентов замены

Для определения сопротивления простому сжатию образцов бетона в возрасте 28 сут к их поверхности прикладывали силу. Сопротивление простому сжатию образцов рассчитывали путем расчета сжимающей силы, приводящей к разрушению образца, и расчета поверхности, подвергающейся воздействию этой силы. В табл. 8 представлены результаты.

Зависимость кубического сопротивления литых образцов ($10 \times 10 \times 10$ см) при простом давлении от коэффициентов замены, а также от формы представлена на рис. 12.

Бетон приобретает свою прочность в результате пуццолановой реакции между кремнеземом в пуццолане и гидроксидом кальция, высвобождаемым во время гидратации портландцемента, где при низких коэффициентах замещения количество кремнезема невелико и, следовательно, может образоваться только ограниченное количество C-S-H, хотя из-за относительно большого количества портландцемента

Табл. 7. Результаты измерения теплопроводности бетонных смесей

Table 7. Results of measuring thermal conductivity of concrete mixtures

Смесь The mixture	Толщина, м Thickness, m	Космос, m^2 Space, m^2	Изменение температуры, $^\circ C$ Change temperature in, $^\circ C$	Количество переданной тепловой энергии W Amount of thermal energy transferred W	Теплопроводность λ , Вт/мк Thermal conductivity λ , W/mk	Тепловое сопротивление R , мк/Вт Thermal resistance R , mk/W
NC	0,1	0,01	66	37,373	1,102	0,9071
GCP _{10%}			64	36,848	1,093	0,9146
GCP _{30%}			64	36,640	1,087	0,9198
GCP _{50%}			64	35,520	1,054	0,9488
NCR			91	39,24	1,078	0,9275
GCR _{p10%}			86	36,69	1,022	0,9784
GCR _{p30%}			79	33,26	0,945	1,0583
GCR _{p50%}			69	28,88	0,844	1,1842

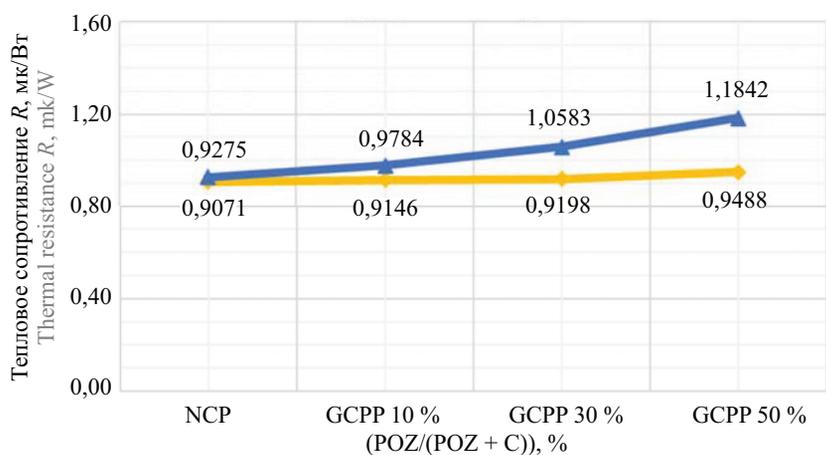


Рис. 11. Изменение теплового сопротивления в зависимости от коэффициента замещения

Fig. 11. Variation of thermal resistance depending on the substitution factor

Табл. 8. Результаты измерения сопротивления бетонных смесей простому сжатию

Table 8. Results of measuring the resistance of concrete mixtures to simple compression

Смесь The mixture	$\left(\frac{POZ}{POZ + C}\right), \%$	Прочность при сжатии, кг/см ² Resistance to slight pressure, kg/cm ²
NC	0	330
GCP _{10%}	10	244
GCP _{30%}	30	180
GCP _{50%}	50	162
NCR	0	194
GCR _{P10%}	10	186
GCR _{P30%}	30	155
GCR _{P50%}	50	154

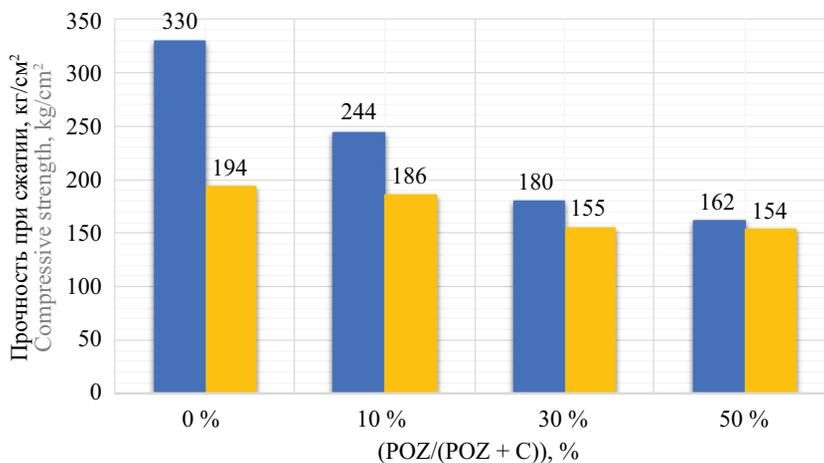


Рис. 12. Зависимость между простым сопротивлением бетона давлению и коэффициентами замещения

Fig. 12. Relationship between simple concrete pressure resistance and replacement factors

выделилось большое количество гидроксида кальция. Однако при высокой скорости замещения количество пуццолана в смеси увеличивается, т.е. снижается образование C-S-H за счет выделения небольшого количества гидроксида кальция в результате гидратации сравнительно небольшого количества портландцемента, имеющегося в смеси, и таким образом простая прочность на сжатие уменьшается по мере увеличения коэффициента замещения в смесях.

Следует отметить, что полная замена натуральных заполнителей переработанными заполнителями позволила сохранить бетон очень близким к бетону эталонных смесей при тех же соотношениях замены, так как при 50%-ном коэффициенте замены цемента молотым пуццоланом прочность снизилась на 5 %. Этот результат считается имеющим высокую степень важности, принимая во внимание, что другие характеристики существенно не изменяются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В свете полученных результатов о влиянии замены портландцемента молотым пуццоланом и натуральных заполнителей на переработанные заполнители на физические (теплопроводность) и механические (стойкость к простому сжатию) свойства бетона, производимого с целью воздействия на окружающую среду, можно отметить следующие моменты в качестве выводов этого исследования:

- по мере увеличения процента цемента, замененного пуццоланом, работоспособность бетона снижается, поскольку замена цемента пуццоланом равной массы увеличивает объем, поэтому плотность цемента выше плотности пуццолана;
- увеличение процента замены портландцемента натуральным пуццоланом повышает термическую стойкость получаемого бетона;

- переработанные заполнители демонстрируют более высокую термостойкость по сравнению с натуральными заполнителями. Даже когда 50 % цемента заменено натуральным пуццоланом, отмечается увеличение сопротивления более чем на 24 %;

- новые научные результаты показывают, что бетон, изготовленный из переработанного гравия с заменой 50 % цемента природным пуццоланом, предоставляет устойчивую и энергоэффективную альтернативу для строительного применения, особенно с точки зрения теплопроводности;

- устойчивость к простому давлению снижается с увеличением доли замены цемента молотым пуццоланом в смесях;

- вторичный гравий дает приемлемые значения устойчивости к простому давлению при использовании в разных пропорциях в бетоне, что открывает широкий простор для размышлений о его использовании в бетоне гражданских сооружений;

- значения сопротивления простому сжатию кубических образцов превышают минимальные пределы сирийской спецификации для цементных блоков. Это позволит производить цементные блоки с использованием переработанных заполнителей с возможностью замены цемента молотым пуццоланом в соответствии с различными коэффициентами замены;

- добавление природного пуццолана дало возможность снизить теплопроводность бетона, что привело к улучшению его изоляционных свойств. Это обусловлено уникальным химическим составом природного пуццолана, который улучшает термическое сопротивление бетонной матрицы. Кроме того, использование переработанного гравия в составе бетонной смеси позволяет улучшить общую прочность и долговечность материала, дополнительно улучшая его тепловые характеристики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Понов К.Н.* Полимерные и полимерцементные бетоны, растворы и мастики : учебное пособие. М. : Высшая школа, 1987. 72 с
2. *Osei D.Y., Jackson E.N.* Compressive strength and workability of concrete using natural pozzolana as partial replacement of ordinary Portland cement // *Advances in Applied Science Research*. 2012. Vol. 3. Issue 6. Pp. 3658–3662.
3. *Wang Y.* Research on the Sustainability in Green Building // *Advances in Economics, Business and Management Research*. 2022. DOI: 10.2991/aebmr.k.220405.231
4. *Aabid A., Baig M.* Sustainable Materials for Engineering Applications // *Materials*. 2023. Vol. 16. Issue 18. P. 6085. DOI: 10.3390/ma16186085
5. *Wang H., Cao C.* On how to move from green building to green ecological city // *Building Materials and Decoration*. 2018. Vol. 35. Pp. 83–84.

6. *Омран Д., Вассуф М.* Использование информационного моделирования строительных объектов (BIM) с целью изучения ориентации здания при проектировании для достижения их большей устойчивости // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. № 3. С. 436–455. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.436-455
7. *Zhang D., Wu W., Fang P.* Research on the Development of Green Buildings in China // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 555. Issue 1. P. 012095. DOI: 10.1088/1755-1315/555/1/012095
8. *Yuan Q., Liu Z., Zheng K., Ma C.* Chapter 3 — Portland cement concrete // *Civil Engineering Materials*. 2021.
9. *Al-Swaidani A.M.* Natural pozzolana of micro and nano-size as cementitious additive: resistance of concrete/mortar to chloride and acid attack // *Cogent En-*

gineering. 2021. Vol. 8. Issue 1. DOI: 10.1080/23311916.2021.1996306

10. Al-Swaidani A.M. Use of micro and nano volcanic scoria in the concrete binder: Study of compressive strength, porosity and sulfate resistance // Case Studies in Construction Materials. 2019. Vol. 11. P. e00294. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00294

11. Ekolu S.O., Hooton R.D., Thomas M.D.A. Studies on Ugandan Volcanic ash and Tuff // Proceedings from the International Conference on Advances in Engineering and Technology. 2006. Pp. 75–83. DOI: 10.1016/B978-008045312-5/50009-1

12. Ali K., Aljubaayli N. Study the Influence of Replacement the Aggregates of Mortar with Natural Pozzolana on its Fresh and Hardened Properties // Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies — Engineering Sciences Series. 2014.

13. Alsheyab M.A.T. Recycling of construction and demolition waste and its impact on climate change and sustainable development // International Journal of Environmental Science and Technology. 2022. Vol. 19. Issue 3. Pp. 2129–2138. DOI: 10.1007/s13762-021-03217-1

14. Menegaki M., Damigos D. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management // Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. 2018. Vol. 13. Pp. 8–15. DOI: 10.1016/j.cogsc.2018.02.010

15. Dahlbo H., Bachér J., Lähtinen K., Jouttijärvi T., Suoheimo P., Mattila T. et al. Construction and demolition waste management — a holistic evaluation of envi-

ronmental performance // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 10. Pp. 333–341. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.073

16. Zhang L. Production of bricks from waste materials : a review // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 47. Pp. 643–655. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043

17. Colorado H.A., Muñoz A., Monteiro S.N. Circular economy of construction and demolition waste: A case study of Colombia // Sustainability. 2022. Vol. 14. Issue 12. P. 7225. DOI: 10.3390/su14127225

18. Украинский И.С., Майорова Л.П., Саликов Д.А., Шевчук А.С., Чайников Г.А. Повторное использование бетонного и кирпичного лома в качестве заполнителей в бетон // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31. № 2. С. 291–301. DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-2-291-301. EDN NENFHQ.

19. Муртазаев С.А.Ю., Хадисов В.Х., Хаджиев М.Р. Использование керамического кирпичного боя для получения легких керамобетонов // Экология и промышленность России. 2014. № 10. С. 22–25. EDN SQVWOD.

20. Ахмед А.А., Федюк Р.С., Лисейцев Ю.Л., Тимохин Р.А., Мурали Г. Использование бетонного лома Ирака в качестве наполнителя и заполнителя тяжелого и легкого бетона // Строительные материалы и изделия. 2020. Т. 3. № 3. С. 28–39. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-3-28-39. EDN NKXOKJ.

Поступила в редакцию 14 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 28 ноября 2024 г.

Одобрена для публикации 13 февраля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Мустафа Али Вассуф** — инженер-строитель кафедры управления строительством, инженер, магистрант факультета гражданского строительства; **Университет Тишрин**; г. Латакия, Сирия; ResearcherID: HSF-7867-2023, ORCID: 0000-0002-3001-5030; president@tishreen.edu.sy, moustafa.wassouf@tishreen.edu.sy;

Джамал Юнис Омран — PhD в области инженерии управления строительными проектами, доцент, декан факультета гражданского строительства, факультет гражданского строительства; **Университет Тишрин**; г. Латакия, Сирия; Scopus: 57194594127, ResearcherID: ABF-2210-2021, ORCID: 0000-0002-8429-6210; president@tishreen.edu.sy, j-omran@tishreen.edu.Sy;

Али Хейрбек — доктор технических наук в области технологии бетона, строительных материалов, профессор, профессор факультета гражданского строительства; **Университет Тишрин**; г. Латакия, Сирия; ORCID: 0000-0001-8115-1887; president@tishreen.edu.sy, alikheirbek@tishreen.edu.sy.

Вклад авторов:

Мустафа Али Вассуф — участие в разработке и внедрении учебных программ, проведение лабораторных экспериментов, заливка различных образцов смесей, написание статьи.

Джамал Юнис Омран — научное руководство, концепция исследования и разработка методологии, обзор текста, окончательные выводы.

Али Хейрбек — руководство лабораторными работами, научное руководство, проверка результатов, окончательные выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Popov K.N. *Polymer and polymer cement concretes, solutions and mastics*. Moscow, Higher School, 1987; 72. (rus.).
2. Osei D.Y., Jackson E.N. Compressive strength and workability of concrete using natural pozzolana as partial replacement of ordinary Portland cement. *Advances in Applied Science Research*. 2012; 3(6):3658-3662.
3. Wang Y. Research on the Sustainability in Green Building. *Advances in Economics, Business and Management Research*. 2022. DOI: 10.2991/aebmr.k.220405.231
4. Aabid A., Baig M. Sustainable Materials for Engineering Applications. *Materials*. 2023; 16(18):6085. DOI: 10.3390/ma16186085
5. Wang H., Cao C. On how to move from green building to green ecological city. *Building Materials and Decoration*. 2018; 35:83-84.
6. Omran D., Wassouf M. Using Building Information Modeling (BIM) to Study Building Orientation in Design for Greater Stability. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(3):436-455. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.436-455 (rus.).
7. Zhang D., Wu W., Fang P. Research on the Development of Green Buildings in China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 555(1):012095. DOI: 10.1088/1755-1315/555/1/012095
8. Yuan Q., Liu Z., Zheng K., Ma C. Chapter 3 — Portland cement concrete. *Civil Engineering Materials*. 2021.
9. Al-swaidani A.M. Natural pozzolana of micro and nano-size as cementitious additive: resistance of concrete/mortar to chloride and acid attack. *Cogent Engineering*. 2021; 8(1). DOI: 10.1080/23311916.2021.1996306
10. Al-Swaidani A.M. Use of micro and nano volcanic scoria in the concrete binder: Study of compressive strength, porosity and sulfate resistance. *Case Studies in Construction Materials*. 2019; 11:e00294. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00294
11. Ekolu S.O., Hooton R.D., Thomas M.D.A. Studies on Ugandan Volcanic ash and Tuff. *Proceedings from the International Conference on Advances in Engineering and Technology*. 2006; 75-83. DOI: 10.1016/B978-008045312-5/50009-1
12. Ali K., Aljubayli N. Study the Influence of Replacement the Aggregates of Mortar with Natural Pozzolana on its Fresh and Hardened Properties. *Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies — Engineering Sciences Series*. 2014.
13. Alsheyab M.A.T. Recycling of construction and demolition waste and its impact on climate change and sustainable development. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2022; 19(3):2129-2138. DOI: 10.1007/s13762-021-03217-1
14. Menegaki M., Damigos D. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2018; 13:8-15 DOI: 10.1016/j.cogsc.2018.02.010
15. Dahlbo H., Bachér J., Lähtinen K., Jouttijärvi T., Suoheimo P., Mattila T. et al. Construction and demolition waste management — a holistic evaluation of environmental performance. *Journal of Cleaner Production*. 2015; 10:333-341. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.073
16. Zhang L. Production of bricks from waste materials : a review. *Construction and Building Materials*. 2013; 47:643-655. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043
17. Colorado H.A., Muñoz A., Monteiro S.N. Circular economy of construction and demolition waste: A case study of Colombia. *Sustainability*. 2022; 14(12):7225. DOI: 10.3390/su14127225
18. Ukrainskiy I.S., Mayorova L.P., Salikov D.A., Shevchuk A.S., Chainikov G.A. Reuse of concrete and brick scrap as aggregates. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2023; 31(2):291-301. DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-2-291-301. EDN NENFHQ. (rus.).
19. Murtazaev S.A.Yu., Khadisov V.Kh., Khadzhiyev M.R. Use of ceramic brick scrap for producing lightweight ceramic concretes. *Ecology and Industry of Russia*. 2014; 10:22-25. EDN SQVWOD. (rus.).
20. Ahmed A.A., Fedyuk R.S., Liseytshev Yu.L., Timokhin R.A., Murali G. Use of Iraq concrete scrap as filler and aggregate of heavyweight and lightweight concrete. *Construction Materials and Products*. 2020; 3(3):28-39. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-3-28-39. EDN NKXOKJ. (rus.).

Received August 14, 2024.

Adopted in revised form on November 28, 2024.

Approved for publication on February 13, 2025.

B I O N O T E S : **Moustafa Ali Wassouf** — civil engineer of the Department of Construction Management, engineer, master's student of the Faculty of Civil Engineering; **Tishreen University**; Latakia, Syria; ResearcherID: HSF-7867-2023, ORCID: 0000-0002-3001-5030; president@tishreen.edu.sy, moustafa.wassouf@tishreen.edu.sy;

Jamal Younis Omran — PhD in Construction Project Management Engineering, Professor, Dean of Faculty of Civil Engineering; **Tishreen University**; Latakia, Syria; Scopus: 57194594127, ResearcherID: ABF-2210-2021, ORCID: 0000-0002-8429-6210; president@tishreen.edu.sy, j-omran@tishreen.edu.sy;

Ali Kheirbek — PhD in Concrete Technology, Building Materials, Professor, Professor at the Faculty of Civil Engineering; **Tishreen University**; Latakia, Syria; ORCID: 0000-0001-8115-1887; president@tishreen.edu.sy, alikhairbek@tishreen.edu.sy.

Contribution of the authors:

Moustafa Ali Wassouf — participation in developing and implementing curricula, conducting laboratory experiments, pouring different samples of mixtures, writing scientific article.

Jamal Eunice Omran — scientific guidance, concept of research and development of methodology, text review, final conclusions.

Ali Kheirbek — supervision of laboratory work, scientific guidance, verification of results, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interests.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.3

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.545-558

Гидрофизические и механические свойства мелкозернистого бетона на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего

Хамза Абдулмалек Кайс¹, Нина Николаевна Морозова²

¹ Университет Саны; г. Сана, Йеменская Республика;

² Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Наиболее важными показателями мелкозернистого бетона на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего, позволяющими расширить возможности его применения в несущих строительных конструкциях зданий, являются прочностные и гидрофизические свойства. Особенно это актуально для конструкций, которые эксплуатируются в условиях жаркого тропического климата Йеменской Республики и будут находиться в сложном напряженно-деформированном состоянии. С другой стороны, низкая способность гипсоцементно-пуццоланового бетона выдерживать воздействие влаги, проникающей в тело бетона вместе с агрессивными веществами из окружающей среды, очевидно, будет приводить к потере его первоначальных свойств.

Материалы и методы. Для приготовления гипсоцементно-пуццоланового вяжущего использовали гипсовое вяжущее марки Г-5 и цементное вяжущее марки ЦЕМ I 42,5Н, а также два вида пуццолановых добавок: природный цеолит и микрокремнезем. В качестве волокнистого материала применяли базальтовую фибру, в качестве химических модификаторов — суперпластификатор марки Master Glenium 112 и гидрофобизатор кристаллизационного действия марки Flocrete WP Crystal. Для приготовления гипсоцементно-пуццоланового бетона в качестве мелкого заполнителя использовали нефракционированный природный кварцевый песок и два вида песка, рассеянного по фракциям. Методом глубокого проникновения воды под давлением исследована водонепроницаемость гипсоцементно-пуццоланового бетона. Подвижность определяли по диаметру расплыва гипсоцементно-пуццолановой смеси по ГОСТ 23789–2018 с использованием прибора Суттарда; прочность на сжатие оценивали после 28 суток твердения в соответствии с ГОСТ 10180–2012; водопоглощение — по методике ГОСТ 23789–2018; водостойкость оценивали по коэффициенту размягчения.

Результаты. В результате проведенных экспериментов получен оптимальный состав гипсоцементно-пуццоланового бетона с высокими прочностными и гидрофизическими свойствами за счет оптимального гранулометрического состава мелкого заполнителя, армирования фибровым волокном и применения различных комплексных химических добавок.

Выводы. Получены следующие показатели: прочность при сжатии 60 МПа, водопоглощение 2,8 %, коэффициент размягчения 1,17, водонепроницаемость W10.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гипсоцементно-пуццолановое вяжущее, водопоглощение, подвижность, прочность, водостойкость, водонепроницаемость, глубина проникновения воды

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кайс Х.А., Морозова Н.Н. Гидрофизические и механические свойства мелкозернистого бетона на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 4. С. 545–558. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.545-558

Автор, ответственный за переписку: Хамза Абдулмалек Кайс, hamza.qais@mail.ru.

Hydrophysical and mechanical properties of fine-grained concrete based on gypsum cement pozzolanic binder

Hamza A. Qais¹, Nina N. Morozova²

¹ University of Sana'a; Sana'a, Republic of Yemen;

² Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The most important indicators of fine-grained concrete based on gypsum cement pozzolanic binder, allowing to expand the possibilities of its application in load-bearing building structures, are strength and hydrophysical properties. This is especially relevant for structures that are used in the hot tropical climate of the Republic of Yemen and will be in a complex stress-strain state. On the other hand, the low ability of gypsum cement pozzolanic concrete to withstand the effects of moisture penetrating into the “body” of concrete together with aggressive substances from the environment will obviously lead to the loss of its original properties.

Materials and methods. To prepare the gypsum cement pozzolanic binder, we used gypsum binder grade G-5 and cement binder grade CEM I 42.5N, as well as two types of pozzolanic additives: natural zeolite and microsilica. Basalt fibre was used as a fibrous material. Superplating agent grade Master Glenium 112 and crystallization water repellent grade Flocrete WP Crystal were used as chemical modifiers. To prepare the gypsum cement pozzolanic concrete, unfractionated natural

quartz sand and two types of sand dispersed by fractions were used as fine aggregate. The water permeability of gypsum cement pozzolanic concrete was studied using the method of water penetration depth under pressure. The mobility was determined by the diameter of the gypsum-cement-pozzolanic mixture flow — according to GOST 23789–2018 using the Suttard device; compressive strength was assessed after 28 days of hardening in accordance with GOST 10180–2012; water absorption — according to the method of GOST 23789–2018; water resistance was assessed by the softening coefficient.

Results. As a result of the experiments, an optimal composition of gypsum-cement-pozzolanic concrete with high strength and hydrophysical properties was obtained due to the optimal granulometric composition of fine aggregate, reinforcement with fibre and the use of various complex chemical additives.

Conclusions. The study yielded the following results: compressive strength 60 MPa, water absorption 2.8 %, softening coefficient 1.17, water resistance W_{10} .

KEYWORDS: gypsum-cement-pozzolanic binders, water absorption, mobility, strength, water resistance, water impermeability, water penetration depth

FOR CITATION: Qais H.A., Morozova N.N. Hydrophysical and mechanical properties of fine-grained concrete based on gypsum cement pozzolanic binder. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(4):545-558. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.545-558 (rus.).

Corresponding author: Hamza A. Qais, hamza.qais@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Важный показатель всех строительных материалов — их долговечность [1–6], которая выражается в сохранении как физико-механических свойств, так и эстетичного внешнего вида, что для конечного потребителя зачастую становится главным фактором при выборе изделий. Долговечность бетона определяется степенью проницаемости агрессивных флюидов и газов [7]. На практике оценка проницаемости бетона осуществляется в основном по мере его водонепроницаемости. Это объясняется простотой и удобством данного флюида. Кроме того, водонепроницаемость определяет другие гидрофизические свойства бетона, такие как морозостойкость и водостойкость.

Бетоны на основе гипсоцементно-пуццолановых вяжущих (ГЦПВ) в сравнении с цементными имеют относительно короткий срок службы. Одной из причин разрушения бетона железобетонных конструкций на основе ГЦПВ служит высокое значение его открытой капиллярной пористости и, как следствие, существенное водопоглощение. Влага, проникающая вглубь бетона, ослабляет однородную структуру конструкций, способствует образованию раковин, трещин, а впоследствии вызывает разрушение и коррозии. В дополнение к этому при замерзании в структуре бетона вода при переходе в лед увеличивается в объеме и разрушает бетон, что приводит к снижению его долговечности [8, 9].

Как известно, ключевыми свойствами, определяющими долговечность ГЦПВ-бетонов, являются водонепроницаемость и водостойкость [10–12], для улучшения которых применяют различные материалы, например минеральные наполнители с высоким пуццолановым эффектом [13–15], пластифицирующие добавки [16–19], специальные добавки: гидрофобизирующие [20] и гидрофильные добавки кристаллизационного действия [21], микроармирование различными видами фибр минерального или органического происхождения [22–24] и др.

Одно из направлений совершенствования технологии цементного бетона — его микроармирование

волокнами различного вида, так называемой фиброй. Фиброармирование бетона повышает показатель его водонепроницаемости [25, 26], а совместно с комплексными добавками увеличивается прочность и водостойкость, тем самым растет сопротивляемость проникновению воды.

Для повышения водонепроницаемости бетона, кроме специальных и комплексных добавок, могут быть использованы плотные заполнители [27]. Приготовление бетонов на фракционированных заполнителях способствует созданию более плотной структуры и высокой прочности, вместе с этим повышается его водонепроницаемость.

Поскольку на водонепроницаемость цементного бетона влияют многие факторы, а именно водоцементное (В/Ц) отношение [28, 29], структура порового пространства [30], вид, размер зерен заполнителей и их количество [31, 32], то они могут отразиться и в бетоне на основе ГЦПВ.

Следует отметить, что испытание ГЦПВ-бетона на водонепроницаемость в тематической литературе не описывается, по сути, авторы в своих публикациях [8, 10, 11, 14, 18–20] не ставили и не решали такую задачу. Для подобных материалов в настоящее время существует несколько методов ее измерения [33]. Среди них можно выделить следующие четыре: метод «мокрого пятна», коэффициент фильтрации, глубина проникновения воды, воздухопроницаемость. Кроме этих, применяют и другие прямые и косвенные методы испытания бетона на водонепроницаемость [34–36], а также методы, приведенные в патентах РФ на изобретения [37, 38]. В Европе широко используется метод оценки водонепроницаемости бетона по глубине проникновения воды под давлением [39–41], который описан в EN 12390-8:2019 «Испытание затвердевшего бетона. Часть 8: Глубина проникновения воды под давлением». В Америке, например, действует стандарт ASTM C1585-20 «Стандартный метод испытаний для измерения скорости поглощения воды гидроцементными бетонами» и отсутствует прямой метод определения их водонепроницаемости. Рассмотренные методики оценки

водонепроницаемости касаются бетонов на гидравлических вяжущих, тогда как ГЦПВ в большей своей части состоит из гипсового вяжущего, относящегося к воздушным вяжущим веществам. Сегодня в литературе отсутствует информация по установленному методу испытания ГЦПВ-бетона по этому показателю. Поэтому в настоящем исследовании водопроницаемость ГЦПВ-бетона оценивали по EN 12390-8:2019 «Испытание затвердевшего бетона. Часть 8: Глубина проникновения воды под давлением», который для Йеменской Республики является основным.

Однако экспериментальных работ по установлению значений водонепроницаемости ГЦПВ-бетонов нет, отсутствуют и данные о корреляции с водопоглощением и коэффициентом размягчения, которые служат единственными и признанными показателями оценки стойкости ГЦПВ к увлажнению.

Цель настоящего исследования — сравнительный анализ влияния состава ГЦПВ-бетонов различных классов по прочности на их гидрофизические показатели. При этом решаются следующие задачи: определение прочности при сжатии и построение кинетических кривых твердения ГЦПВ-бетона с различным количеством мелкого заполнителя и вида модификаторов; определение водопоглощения и водостойкости ГЦПВ-бетонов различных составов; определение влияния прочности ГЦПВ-бетонов на их гидрофизические показатели; установление и анализ зависимости водопоглощения, глубины проникновения воды под давлением от прочности, а также взаимосвязь водопоглощения ГЦПВ-бетонов различных классов по прочности с глубиной проникновения воды под давлением.

Предмет исследования — определение гидрофизических и механических свойств мелкозернистого бетона, изготовленных на основе ГЦПВ.

Объект исследования — модифицированный мелкозернистый бетон на основе ГЦПВ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для приготовления ГЦПВ использовали гипсовое и цементное вяжущие, а также два вида пуццолановых добавок (АМД): природный цеолит и микрокремнезем. В качестве гипсового вяжущего использовали (ГВ) марки Г-5, производимое ООО Develop a nation (Йеменская Республика) по EN 13279-1:2008. В качестве цементного вяжущего применяли портландцемент (ПЦ) марки ЦЕМ I 42,5Н Amran cement (Йеменская Республика), удовлетворяющий ASTM C 150 – TYPE 1, его паспортный минералогический состав представлен в табл. 1, химический состав — в табл. 2.

Природный цеолит (ЦЕО) в виде мелкозернистого материала светло-зеленого цвета с наибольшим размером зерен 1 мм перед применением в составе ГЦПВ высушивали до постоянной массы и измельчали до порошкообразного состояния с удельной поверхностью 6500 см²/г. ЦЕО получен с предприятия Yemen zeolite в г. Сана (Йеменская Республика). Его пуццолановая активность по поглощению СаО из насыщенного известкового раствора составила 815 мг/г.

Микрокремнезем (МК) взят с Саудовского металлургического комбината BUILMIX. Он представляет собой дисперсный продукт с частицами сферической формы размером 0,01–0,1 мкм, характеризующийся удельной поверхностью 38 000 см²/г и пуццолановой активностью 1210 мг/г. Химические составы ЦЕО и МК приведены в табл. 2.

Базовый состав ГЦПВ, определенный в работе [15], следующий: Г:ПЦ:МК:ЦЕО = 60:25:10:5 % по массе.

В качестве волокнистого материала использовали базальтовую фибру (БАЗ) производства ООО Arab Basalt Fiber Company г. Фуджайра (Объединенные Арабские Эмираты), которая представляет собой отрезки базальтового непрерывного волокна, собранные во временные пучки (монофиламенты).

Табл. 1. Минералогический состав цемента

Table 1. Mineralogical composition of cement

Маркировка цемента Cement marking	Минеральный состав клинкера, % Mineral composition of clinker, %			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Амран цемент (ЦЕМ I 42,5Н) Amran cement (CEM I 42.5H)	53,8	20,9	6,4	12,04

Табл. 2. Химический состав цемента и активных минеральных добавок

Table 2. Chemical compositions of cement and active mineral additives

Маркировка материала Material marking	Количество, % / Quantity, %									
	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MnO	SO ₃
ПЦ / PC	20,59	63,35	2,94	3,77	–	4,96	–	–	–	1,96
ЦЕО / ZEO	71,3	0,89	0,43	3,44	0,99	11,12	2,69	0,22	0,02	–
МК / SF	53,8	5,7	2,3	5,2	0,6	26,72	0,7	1,4	–	–

Табл. 3. Показатели фракционированного состава песков

Table 3. Indicators of fractional composition of sands

Маркировка песка Sand marking	Содержание фракций, % / Content of fractions, %						Насыпная плотность, кг/м ³ Bulk density, kg/m ³	Пустотность, % Voidness, %	Модуль крупности Module of fineness
	>2,5 мм / mm	2,5–1,25 мм / mm	1,25–0,63 мм / mm	0,63–0,315 мм / mm	0,315–0,16 мм / mm	<0,16 мм / mm			
Нефракционированный / No frac.	23	26	27	10	13	1	1605	39,4	2,35
Фракционированный № 1 / Fr. No. 1	0	70	15	5	5	5	1665	36,4	3,4
Фракционированный № 2 / Fr. No. 2	0	55	10	10	20	5	1634	38,3	2,90

Разработанная комплексная добавка (КД) с оптимальной дозировкой 1,5 % от массы ГЦПВ, выбранная как наиболее эффективная из широкого спектра пластифицирующих добавок по проведенным ранее исследованиям [17], состояла из суперпластификатора марки Master Glenium 112 производства Master Builders Solutions MBCC-GROUP (Германия) и гидрофобизатора кристаллизационного действия марки Flocrete WP Crystal в количестве 2 % [21].

Для приготовления ГЦПВ-бетонов в качестве заполнителя использовали нефракционированный песок Дафирского месторождения (Йеменская Республика) и фракционированный — двух составов с наилучшими свойствами [42]. Характеристики песков представлены в табл. 3.



Рис. 1. Установка для испытания образцов бетона по глубине проникновения воды под давлением

Fig. 1. Installation for testing concrete specimens for the depth of water penetration under pressure



Рис. 2. Схема процесса испытания глубины проникновения воды под давлением в образцы ГЦПВ-бетона: *a* — образец ГЦПВ-бетона, контактирующий с водой под давлением в испытательной установке; *b* — способ раскалывания образца пополам для замера глубины проникновения воды; *c* — схема измерения в трех местах и определения среднего значения глубины мокрого пятна на поверхности разлома

Fig. 2. Scheme of the process of testing the depth of water penetration under pressure into specimens of GCPB concrete: *a* — GCPB concrete specimen in contact with water under pressure in a test setup; *b* — a method of splitting the specimen in half to measure the depth of water penetration; *c* — a diagram of measuring in three places and determining the average value of the depth of the wet spot on the fracture surface

Методы испытания

Используя стандартные методики, были определены:

- подвижность по диаметру расплыва ГЦПВ-смеси — по ГОСТ 23789–2018 с использованием прибора Суттарда;

- прочность на сжатие ГЦПВ-бетона оценивали после 28 сут твердения в соответствии с ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» на образцах-кубиках с размерами ребра 150 мм;

- водопоглощение ГЦПВ-бетона — по методике ГОСТ 23789–2018;

- водостойкость ГЦПВ-бетона оценивали по коэффициенту размягчения, который рассчитывали из отношения предела прочности на сжатие образцов в водонасыщенном состоянии (водонасыщение производили в течение 48 ч) к пределу прочности на сжатие образцов в сухом состоянии;

- водонепроницаемость бетона оценивали по глубине проникновения воды под давлением, которая описана в EN 12390-8:2019 «Испытание затвердевшего бетона. Часть 8: Глубина проникновения воды под давлением» и применяется в Европе [31–37], показатель водонепроницаемости оценивали на образцах-кубиках размером 150 × 150 × 150 мм, суть которого заключается в оценке глубины проникновения воды после 72-часового приложения давления 0,5 МПа. По истечении этого времени образцы раскалывали на две части, замеряли максимальную глубину проникновения воды в бетон с точностью до 1 мм, и по среднеарифметическому значению глубины проникновения воды трех образцов определяли класс водонепроницаемости бетона по таблице ГОСТ 12730.5–2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости». Все образцы до испытания хранили в камере нормального твердения в течение 28 сут и одни сутки в комнатных условиях. Испытание образцов на водонепроницаемость проводили на установке Form+Test WE 6 MMZ (Германия), представленной на рис. 1, по схеме, показанной на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первоначально установлено количество воды для составов ГЦПВ-бетонов с химическими добавками (Flocrete WP Crystal, Master Glenium 112) и базальтовой фиброй из условия получения равноподвижных смесей, которые по расплыву вискозиметра Суттарда имели диаметр 185 ± 5 мм. Составы бетонов, имеющих различное В/Ц отношение и ГЦПВ:П, приведены в табл. 4.

Изготовленные образцы из составов ГЦПВ-бетона твердели в нормально-влажных условиях в течение 180 сут. В этот период времени были определены коэффициент размягчения, средняя плотность и прочность на сжатие. Результаты испытаний показаны в табл. 5 и на рис. 3.

Как видно из табл. 5, для всех составов с увеличением времени твердения коэффициент размягчения возрастает, достигая значений через 180 сут от 0,8 до 1,31. При этом наибольший прирост (40,9 %) от одних до 180 сут достигается для состава С4, а наименьший — для С5 (12,8 %). Полученные данные указывают на то, что мелкозернистые ГЦПВ-бетоны обладают хорошей водостойкостью. Средняя плотность также закономерно возрастает, особенно при использовании фракционированного песка. Наибольшие значения получены для состава С2, у которого плотность достигла 2148 кг/м³ через 180 сут.

Как видно из рис. 3, с течением времени наблюдается рост прочности на сжатие у всех исследованных составов. Наибольшей прочностью характеризуется состав С4 как в раннем возрасте, так и в 180-суточном возрасте твердения. К этому составу С4 близок по значению прочности и скорости ее набора состав С3. Авторы считают, что этому способствует комплексная добавка, а фибровое армирование в составе С4 позволяет повысить прочность на 9–12 % относительно состава С3. Все остальные составы ГЦПВ-бетона с монодобавкой имеют прочность на сжатие не более 40 МПа. Наименьшую прочность на сжатие во все исследованные сроки твердения показал состав С0 на нефракционирован-

Табл. 4. Составы мелкозернистого ГЦПВ-бетона

Table 4. Compositions of fine-grained GCPB concrete

Условное обозначение состава Conventional designation of composition	Номер песка по табл. 3 No. Sand according to Tbl. 3	В/Ц W/S	ГЦПВ:П GCPB:S	Вид и содержание химических добавок в % от массы ГЦПВ Type and content of chemical additives in % of the mass of the GCPB		БАЗ, % от массы бетона BAZ, % of concrete mass
				Flocrete WP Crystal	Master Glenium 112	
С0	№ 1	0,330	1:1	–	1,5	–
С1	№ 2	0,274	1:1	–	1,5	–
С2		0,290	1:2	–	1,5	–
С3		0,265	1:1	2	1,5	–
С4		0,285	1:1	2	1,5	0,6
С5	№ 3	0,282	1:1	–	1,5	–

Табл. 5. Кинетика плотности и коэффициента размягчения различных составов ГЦПВ-бетона

Table 5. Kinetics of density and softening coefficient of various compositions of GCPB concrete

Условное обозначение составов Conventional designation of compositions	Коэффициент размягчения и средняя плотность, кг/м ³ , в возрасте, сут Softening coefficient and average density, kg/m ³ , at age, days							
	1	3	7	14	28	48	90	180
C0	0,68	0,7	0,73	0,74	0,75	0,77	0,78	0,8
	1982	1989	1993	2005	1995	1997	1991	1985
C1	0,81	0,83	0,86	0,87	0,89	0,9	0,91	0,92
	2016	2029	2037	2094	2072	2070	2062	2051
C2	0,75	0,77	0,79	0,81	0,83	0,84	0,85	0,86
	2136	2154	2163	2197	2164	2159	2163	2148
C3	0,89	0,92	0,95	0,97	1,09	1,1	1,15	1,18
	2061	2074	2091	2132	2109	2100	2090	2082
C4	0,93	0,96	0,99	1,05	1,17	1,23	1,27	1,31
	2084	2095	2110	2133	2165	2167	2166	2161
C5	0,78	0,8	0,82	0,83	0,85	0,86	0,87	0,88
	1991	2012	2019	2041	2028	2016	2000	1991

ном песке. Состав бетона C2, в котором количество заполнителя в два раза больше, чем в составе C0, характеризуется большими показателями прочности на сжатие на 35 % и меньшим В/Ц отношением на 12 % благодаря фракционированию песка.

По результатам испытаний на сжатие определены классы ГЦПВ-бетона с учетом его показателей однородности (ГОСТ 18105), значения которых представлены в табл. 6. Гидрофизические свойства ГЦПВ-бетона разных марок по прочности оценивали по марке водонепроницаемости и водопоглощению (табл. 6).

Результаты испытаний бетонов показывают (табл. 6), что использование фракционированного песка состава № 1 (C2 по табл. 3) позволяет снизить водопоглощение бетона на 32 % в сравнении с контрольным составом (C0 по табл. 3), а применение фракционированного песка состава № 2 (C5 по табл. 3) — лишь на 23 %. Считаем, что факт снижения водопоглощения ГЦПВ-бетона с применением фракционированных песков обусловлен более плотной упаковкой его зерен и снижением пустотности [42, 43]. Наибольшим снижением значения водопоглощения испытанных составов ГЦПВ-бетона обладает состав

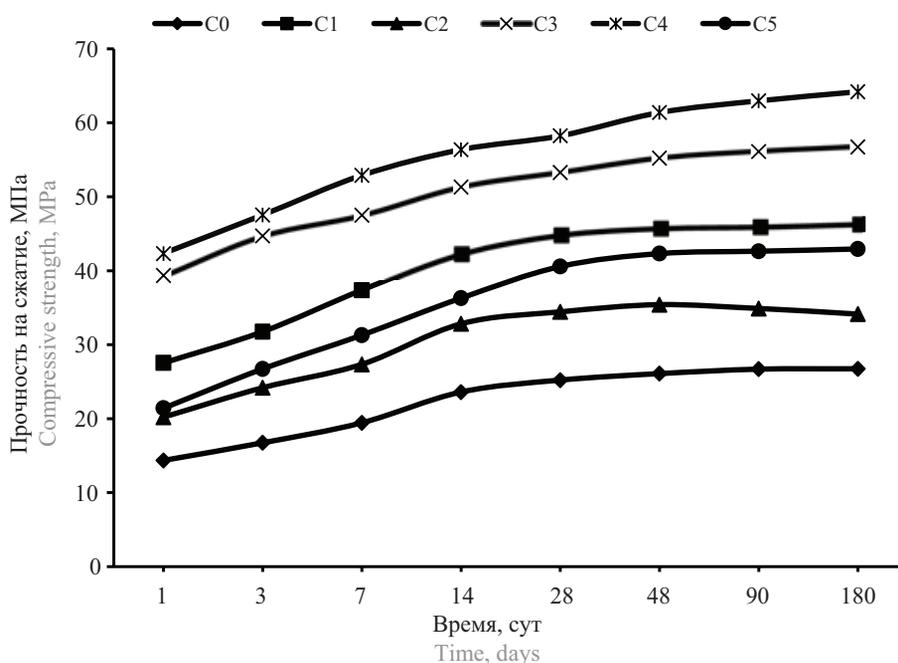


Рис. 3. Кинетика прочности на сжатие ГЦПВ-бетона

Fig. 3. Kinetics of compressive strength of GCPB concrete

Табл. 6. Механические и гидрофизические показатели ГЦПВ-бетонов

Table 6. Mechanical and hydrophysical properties of GCPB concrete

Шифр состава Composition code	Прочность бетона в партии R_m , МПа Concrete strength in a batch R_m , МПа	Среднеквадратическое отклонение S_m Standard deviation S_m	Текущий коэффициент вариации V_m , % Current coefficient of variation V_m , %	Фактический класс бетона по прочности B_f Actual concrete strength class B_f	Ближайший класс бетона по прочности The closest concrete strength class	Глубина проникновения воды в образец, мм Depth of water penetration into the specimen, mm	Марка по водонепроницаемости W (по [44]) Waterproof grade W (according to [44])	Водопоглощение, % Water absorption, %
C0	25,21	4,11	16,30	20,17	B20	145	2	10,62
C1	44,85	3,78	8,43	35,88	B35	109	6	7,18
C2	34,45	3,04	8,82	27,56	B27,5	130	2	10,45
C3	52,28	2,95	5,64	41,82	B40	84	8	3,21
C4	58,24	2,46	4,22	46,59	B45	75	10	2,77
C5	40,57	3,17	7,81	32,46	B30	125	4	8,15

С3 с классом по прочности В40. Применение добавки Flocrete WP Crystal кристаллизационного принципа действия в составе С3 позволило уменьшить водопоглощение до 3,2 % против 10,6 % для контрольного состава (С0). Снижение водопоглощения ГЦПВ-бетона с добавкой Flocrete WP Crystal обусловлено уплотнением его микроструктуры [21].

Фибровое армирование ГЦПВ бетона дало возможность не только повысить его прочность, но и снизить водопоглощение до значения 2,8 % (со-

став С4). Меньшее водопоглощение мелкозернистого ГЦПВ-бетона на фракционированном песке с базальтовой фиброй связываем с изменением порового пространства так, что вода проникает на незначительную глубину 2–3 мм [7]. Подтверждающим фактом снижения водопоглощения ГЦПВ-бетона являются и невысокие значения коэффициента размягчения бетона (табл. 5), так для контрольного состава оно составляет 0,75, в то же время для образцов с модифицирующими добавками — 0,83–1,17 в зависимо-

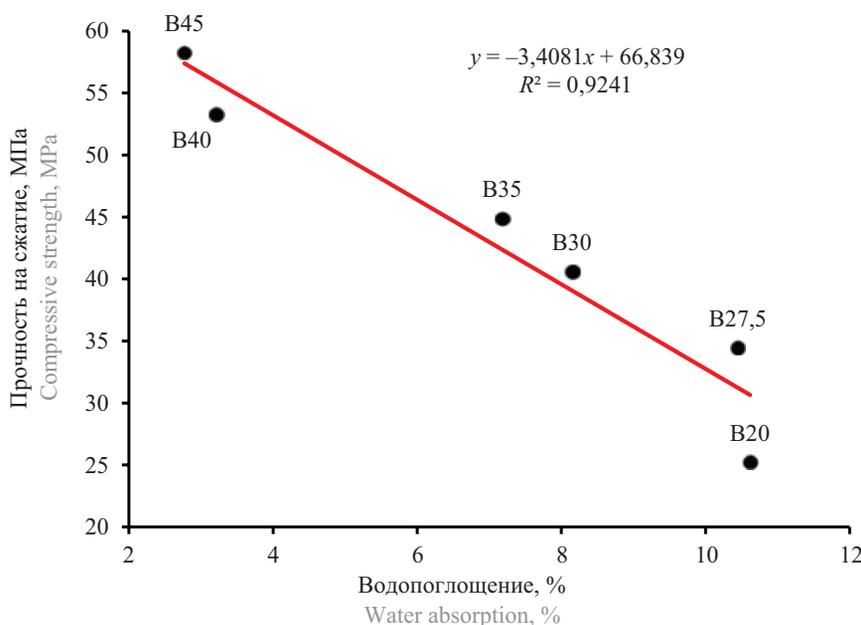


Рис. 4. Зависимость водопоглощения ГЦПВ-бетона от его прочности на сжатие

Fig. 4. Dependence of water absorption of GCPB concrete on its compressive strength

сти от вида модификаторов. Существенное влияние на водопоглощение оказывает фактическая прочность ГЦПВ-бетона (рис. 4).

Как видно из рис. 4, наименьшим водопоглощением характеризуются составы ГЦПВ-бетона с большей прочностью на сжатие, и эта зависимость имеет практически линейный характер.

Другими задачами работы было установление зависимостей между прочностью и глубиной проникновения воды под давлением (рис. 5) и между водопоглощением и глубиной проникновения воды

под давлением в зависимости от состава ГЦПВ-бетона (рис. 6).

Из данных рис. 5, 6 видно, что глубина проникновения воды и водопоглощение ГЦПВ-бетона уменьшаются с повышением прочности при сжатии.

Из рис. 6 видно, что водопоглощение и водонепроницаемость испытанных ГЦПВ-бетонов классов от В20 до В45 имеют линейную зависимость.

В результате выполненных исследований установлена зависимость между водопроницаемостью и водопоглощением для классов по прочности ГЦПВ-бетона

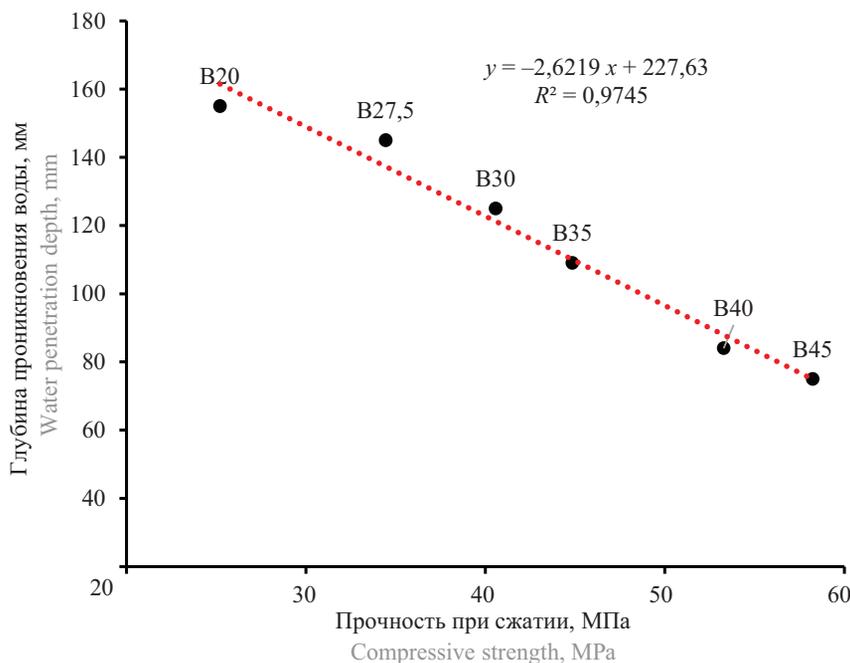


Рис. 5. Зависимость глубины проникновения воды под давлением в ГЦПВ-бетона от его прочности

Fig. 5. Dependence of the depth of water penetration under pressure into GCPB concrete on its strength

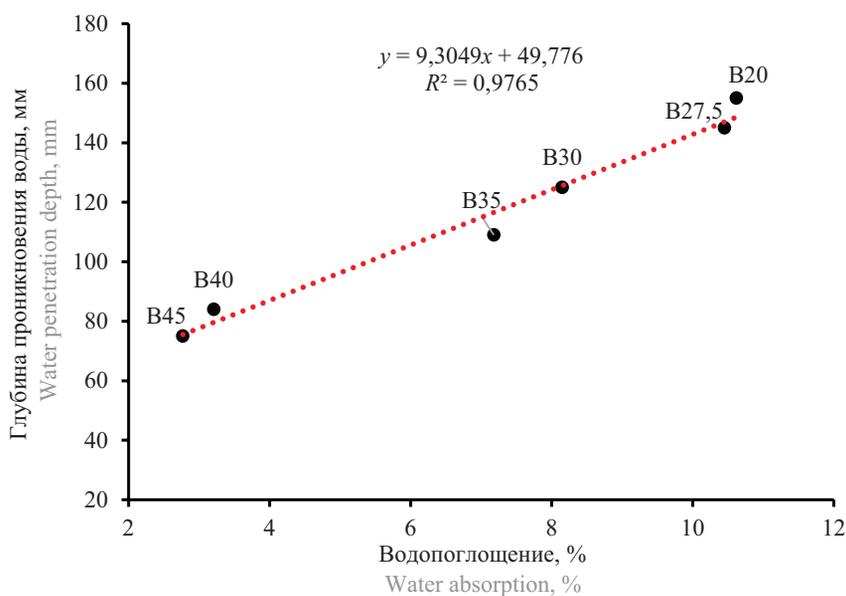


Рис. 6. Зависимость глубины проникновения воды под давлением в ГЦПВ-бетон от его водопоглощения

Fig. 6. Dependence of the depth of water penetration under pressure into GCPB concrete on its water absorption

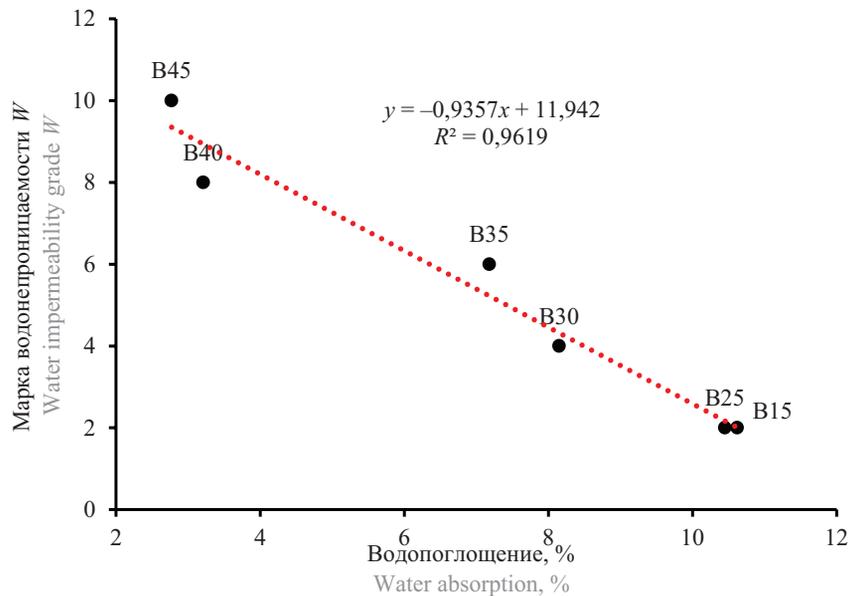


Рис. 7. Зависимость марки по водонепроницаемости ГЦПВ-бетона от показателя водопоглощения

Fig. 7. Dependence of the grade of water impermeability of GCPB concrete on the index of water absorption

от В20 до В45. Значения глубины проникания воды в образцы ГЦПВ-бетона тем больше, чем выше его значение водопоглощения (рис. 6). Минимальной глубиной проникновения воды под давлением в 0,5 МПа, равной 75 мм (табл. 6), обладает состав бетона С4 с классом по прочности на сжатие В45 и соответствует стандартной марке по водонепроницаемости W10. Мелкозернистый ГЦПВ-бетон с классом по прочности В40 (без фиброармирования) имеет глубину проникания воды под давлением 0,5 МПа, равную 84 мм, что позволяет отнести его к марке по водонепроницаемости W8. В общем глубина проникновения воды в разработанных составах ГЦПВ-бетонов с классом по прочности от В20 до В45 варьируется от 75 до 145 мм, что соответствует маркам по водонепроницаемости от W2 до W10 по [44] (рис. 7).

Итак, знание марки водонепроницаемости мелкозернистого ГЦПВ-бетона позволит определять его назначение при строительстве зданий в климатических условиях Йеменской Республики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа данных, полученных в ходе эксперимента, можно сделать следующие выводы.

Механические свойства мелкозернистого ГЦПВ-бетона могут быть значительно улучшены за счет оптимального гранулометрического состава мелкозернистого заполнителя, армирования фибровым волокном и применения различных комплексных химических добавок. В зависимости от классов по прочности

В20–В45 разработанные составы имеют следующие механические и гидрофизические свойства: прочность при сжатии от 25 до 60 МПа, водопоглощение от 2,8 до 10,6 %, коэффициент размягчения от 0,75 до 1,17 и водонепроницаемость W2–W10. Это позволяет отнести эти бетоны к долговечным материалам, которые способны в конструкции воспринимать большие нагрузки и противостоять износу с течением времени.

По результатам гидрофизических испытаний наилучшим является состав ГЦПВ-бетона под номером С4 с классом по прочности В45, водопоглощением 2,8 % и маркой по водонепроницаемости W10.

Установлено, что мелкозернистый ГЦПВ-бетон имеет практически линейную зависимость водопоглощения от его прочности на сжатие.

Совместное применение с добавками Master Glenium 112 и Flocrete WP Crystal фибрового армирования для приготовления ГЦПВ-бетона способствовало получению высокой прочности и водонепроницаемости.

Полученные зависимости имеют существенное значение в практическом применении, так, по значению водопоглощения можно спрогнозировать марку ГЦПВ-бетона по водонепроницаемости.

Для получения полной информации о ГЦПВ-бетоне и применения его для изготовления железобетонных изделий следует оценить его защитные свойства по отношению к арматуре, а также конструкционные показатели (призмную прочность, модуль упругости и т.п.).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хантимиров А.Г., Сулейманов А.М., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Хохряков О.В. Влияние модификации на долговечность поливинилхлоридных древесно-полимерных композитов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 3 (65). С. 26–35. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_26. EDN CMSMHV.
2. Альтдинова А.И., Хамидуллина Н.Р., Кузнецова Г.В. Влияние вида песка на долговечность и свойства силикатных изделий автоклавного твердения // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. 2023. № 1 (11). С. 30–39. EDN JEDODO.
3. Вдовин Е.А., Буланов П.Е., Строганов В.Ф. Повышение характеристик дорожных цементогрунтов кремнийорганическими соединениями // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 4 (66). С. 301–309. DOI: 10.52409/20731523_2023_4_301. EDN JZUJND.
4. Хозин В.Г., Морозова Н.Н., Матеюнас А., Захарова Н.А., Акимова Э.П. Исследование внутренней коррозии модифицированных монолитных бетонов на основе местных заполнителей РТ // Технологии бетонов. 2008. № 3. С. 58.
5. Беляков А.Ю., Хохряков О.В., Хозин В.Г. Функционализированный минеральный наполнитель — эффективный модификатор цементных бетонов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 3 (65). С. 45–56. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_45. EDN FCPOKY.
6. Хабидуллина В.С., Аюпов Д.А. Прогноз старения модифицированных битумов // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. 2024. № 1 (12). С. 154–156. EDN GJTGMN.
7. Антонян А.А. Водонепроницаемость бетона с суперпластификаторами // Технологии бетонов. 2017. № 3–4 (128–129). С. 36–39. EDN ZBMNUX.
8. Ферронская А.В., Коровяков В.Ф. Гипсовые вяжущие в ресурсосберегающих системах малоэтажного строительства // Сухие строительные смеси. 2005. № 3. С. 56–57.
9. Гончаров Ю.А., Бурьянов А.Ф. Ключевые факторы успешного развития отрасли гипсовых материалов // Строительные материалы. 2013. № 2. С. 70–72. EDN PXESTF.
10. Ферронская А.В. и др. Гипс в малоэтажном строительстве. М.: Изд-во АСВ, 2008. EDN QNNSHH.
11. Бабков В.В., Латыпов В.М., Ломакина Л.Н., Шигапов Р.И. Модифицированные гипсовые вяжущие повышенной водостойкости и гипсокерамзитобетонные стеновые блоки для малоэтажного жилищного строительства на их основе // Строительные материалы. 2012. № 7. С. 4–8. EDN PFTJZL.
12. Пуценко К.Н., Балабанов В.Б. Перспективы развития и применения сухих строительных смесей на основе гипса // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 7 (102). С. 148–154. EDN UBLONF.
13. Изотов В.С., Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р. Исследование влияния активных минеральных добавок на реологические и физико-механические свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Строительные материалы. 2015. № 5. С. 20–23. EDN TUHVEN.
14. Чернышева Н.В. Водостойкие гипсовые композиционные материалы с применением техногенного сырья: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Белгород, 2014. 22 с. EDN ZPPRAN.
15. Аунг Ч.Н., Потанова Е.Н. Влияние вида пуццолановой добавки на состав и свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Успехи в химии и химической технологии. 2022. Т. 36. № 3 (252). С. 7–9. EDN BXMIEA.
16. Кайс Х.А., Богданов Р.Р., Морозова Н.Н., Мавлюбердинов А.Р., Сулейманова Л.А. Влияние суперпластифицирующих добавок на основе эфира поликарбоксилата на технологические и физико-технические свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2024. № 8. С. 20–28. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-20-28. EDN RXUQHT.
17. Кайс Х.А., Морозова Н.Н. Влияние пластифицирующих добавок на свойства комплексного гипсоцементно-пуццоланового вяжущего (опыт Республики Йемен) // Известия вузов. Строительство. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 8 (788). С. 57–70. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-57-70. EDN OGSNHC.
18. Нуриев М.И., Халиуллин М.И., Рахимов Р.З., Гайфуллин А.Р., Хайрварина А.М., Стоянов О.В. Влияние пластифицирующих добавок на свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18. № 6. С. 119–122. EDN RTPNGF.
19. Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Лукманова Л.В. Влияния пластифицирующих добавок на основные свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего на основе низкомарочного и техногенного сырья // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 4 (38). С. 382–387. EDN XAKONT.
20. Галаутдинов А.Р., Мухаметрахимов Р.Х. Повышение водостойкости гипсоцементно-пуццоланового вяжущего на основе низкомарочного гипса // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 4 (38). С. 333–343. EDN XAKOLB.
21. Кайс Х.А., Морозова Н.Н., Хохряков О.В. Сравнительная эффективность добавок гидрофобизирующего и кристаллизационного действия на свойства

- гипсоцементно-пуццоланового вяжущего и бетона на его основе // *Строительные материалы*. 2024. № 11. С. 63–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-830-11-63-72. EDN CBGAYY.
22. *Mukhametrakhimov R., Galautdinov A., Gorbunova P., Gorbunova T.* Water-resistant fiberreinforced gypsum cement-pozzolanic composites // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 138. P. 01011. DOI: 10.1051/e3sconf/201913801011
23. *Курдюмова С.Е., Потанова Е.Н.* Влияние полипропиленовых волокон на свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // *Успехи в химии и химической технологии*. 2017. Т. 31. № 3 (184). С. 55–57. EDN ZRTOSV.
24. *Potapova E., Manushina A., Urbanov A.* Effect of fibers on the properties of gypsum-cement-pozzolanic binder // *ZKG International*. 2017. Vol. 70. Issue 11. Pp. 42–50. EDN XXLXPV.
25. *Лесовик В.С., Урханова Л.А., Федюк Р.С.* Вопросы повышения непроницаемости фибробетонов на композиционном вяжущем // *Вестник ВСГУТУ*. 2016. № 1 (58). С. 5–10. EDN VQECDN.
26. *Кожухова М.И., Чулкова И.Л., Хархардин А.Н., Соболев К.Г.* Оценка эффективности применения гидрофобных водных эмульсий с содержанием нано- и микроразмерных частиц для модификации мелкозернистого бетона // *Строительные материалы*. 2017. № 5. С. 92–97. EDN YQGAPD.
27. *Залипаева О.А.* Морозостойкость и проницаемость бетона на смеси пористых и плотных заполнителей // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2012. № 3–2 (41). С. 7–10. EDN PCEDSR.
28. *Soongswang P., Tia M., Bloomquist D.* Factors affecting the strength and permeability of concrete made with porous limestone // *ACI Materials Journal*. 1991. Vol. 88. Issue 4. DOI: 10.14359/1915
29. *Ahmad S., Azad A.K., Loughlin K.F.* Effect of the Key Mixture Parameters on Tortuosity and Permeability of Concrete // *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2012. Vol. 10. Issue 3. Pp. 86–94. DOI: 10.3151/jact.10.86
30. *Winslow D.N., Cohen M.D., Bentz D.P., Snyder K.A., Garboczi E.J.* Percolation and pore structure in mortars and concrete // *Cement and Concrete Research*. 1994. Vol. 24. Issue 1. Pp. 25–37. DOI: 10.1016/0008-8846(94)90079-5
31. *Halamiczkova P., Detwiler R.J., Bentz D.P., Garboczi E.J.* Water permeability and chloride ion diffusion in portland cement mortars: Relationship to sand content and critical pore diameter // *Cement and Concrete Research*. 1995. Vol. 25. Issue 4. Pp. 790–802. DOI: 10.1016/0008-8846(95)00069-0
32. *Warda B.A., Munaz A.N.* Effects of Aggregate Gradation on Water Permeability of Concrete // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 488–489. Pp. 248–252. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.488-489.248
33. *Ванькова Н.Р., Фомина А.Е.* Сравнительный эксперимент по определению водонепроницаемости бетона методами «мокрого пятна» и «по воздухопроницаемости» // *Construction and Geotechnics*. 2022. Т. 13. № 1. С. 96–105. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.08. EDN CFZRYX.
34. *Закоршменный А.И.* Сравнение результатов водонепроницаемости бетона подземных сооружений в натуральных условиях, получаемых с использованием прямых и косвенных методов испытаний // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007. № 4. С. 282–294. EDN KVOEEL.
35. *Антонаян А.А.* О некоторых особенностях современных методов определения водонепроницаемости бетона // *Технологии бетонов*. 2017. № 9–10 (134–135). С. 29–33. EDN YMQQFZ.
36. *Семенов С.Я., Арьков Д.П., Марченко С.С.* Экспресс-метод диагностирования водонепроницаемости бетона конструкций гидротехнических сооружений // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2016. № 3 (43). С. 213–220. EDN WWHGHF.
37. Патент RU № 2558824. Способ определения водонепроницаемости строительных материалов / *Кесарийский А.Г., Кондращенко В.И., Кондращенко Е.В., Кендюк А.В., Гусева А.Ю.*; заявл. № 2014116874/15 от 28.04.2014; опубл. 10.08.2015. 9 с.
38. Патент RU № 2795491. Гидроизоляционное сооружение / *Смирнов Э.В., Зданович М.Я., Урминский Д.Г., Скопинов М.В., Русаков М.И., Носов О.А., Елькин А.А.*; заявл. № 2022125751/22 от 29.09.2022; опубл. 04.05.2023. 7 с.
39. *Kassim M.M.* The water permeability properties of re-vibrated lightweight concrete // *Journal of Metals, Materials and Minerals*. 2020. Vol. 30. Issue 1. DOI: 10.55713/jmmm.v30i1.575
40. *Saif Allah S.J., Kassim M.M., Salman G.A.* Concrete Mix Strength and Permeability with Various Supplementary Cementitious Materials // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 427. P. 02005. DOI: 10.1051/e3sconf/202342702005
41. *Hung V.V., Seo S.Y., Kim H.W., Lee G.C.* Permeability and strength of pervious concrete according to aggregate size and blocking material // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Issue 1. P. 426. DOI: 10.3390/su13010426
42. *Кайс Х.А., Морозова Н.Н., Богданов А.Н.* Влияние вида и зернового состава песка на свойства мелко-зернистого бетона на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего (опыт Республики Йемен) // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2024. № 9 (789). С. 65–76. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-789-9-65-76. EDN ZFDWKE.
43. *Morozova N., Kais K., Gilfanov R., Morozov V.* Influence of the fractional composition of the aggregate on the technological and strength properties of HCPV concrete // *AIP Conference Proceedings*. 2022. Vol. 2487. P. 020009. DOI: 10.1063/5.0091723
44. *Антонаян А.А.* Сравнительная оценка методов определения водонепроницаемости бетонов на примере исследования влияния содержания цемента // *Бетон и железобетон*. 2015. № 2. С. 44–47.

Поступила в редакцию 14 января 2025 г.

Принята в доработанном виде 20 января 2025 г.

Одобрена для публикации 13 февраля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Хамза Абдулмалек Кайс** — инженер-исследователь; **Университет Саны**; 13064, г. Сана, Йеменская Республика; SPIN-код: 9386-8763, РИНЦ ID: 868818, ORCID: 0009-0000-2805-7760; hamza.qais@mail.ru;

Нина Николаевна Морозова — кандидат технических наук, доцент; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; ORCID: 0000-0002-7867-4203; ninamor@mail.ru.

Вклад авторов:

Кайс Х.А. — концепция исследования, написание статьи, сбор материала, обработка материала.

Морозова Н.Н. — научное руководство, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Khantimirov A.G., Sulejmanov A.M., Abdrahmanova L.A., Nizamov R.K., Khokhryakov O.V. The effect of modification on the durability of polyvinyl chloride wood-polymer composites. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 3(65):26-35. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_26. EDN CMSMHV. (rus.).
2. Altdinova A.I., Khamidullina N.R., Kuznetsova G.V. The influence of the type of sand on the durability and properties of autoclave-hardened silicate products. *Polymers in Construction: Scientific Online Journal*. 2023; 1(11):30-39. EDN JEDODO. (rus.).
3. Vdovin E.A., Bulanov P.E., Stroganov V.F. Improving the characteristics of road soil-cement with organosilicon compounds. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 4(66):301-309. DOI: 10.52409/20731523_2023_4_301. EDN JZUJND. (rus.).
4. Khozin V.G., Morozova N.N., Mateyunas A., Zakharova N.A., Akimova E.P. Study of internal corrosion of modified monolithic concretes based on local RT fillers. *Concrete technologies*. 2008; 3:58. (rus.).
5. Belyakov A.Yu., Khokhryakov O.V., Khozin V.G. Functionalized mineral filler is an effective modifier for cement concrete. *News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2023; 3(65):45-56. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_45. EDN FCPOKY. (rus.).
6. Khabibullina V.S., Ayupov D.A. Forecast of aging of modified bitumen. *Polymers in Construction: scientific internet journal*. 2024; 1(12):154-156. EDN GJTGMN. (rus.).
7. Antonyan A.A. Resistance of concrete with superplasticizers. *Concrete Technologies*. 2017; 3-4(128-129): 36-39. EDN ZBMNUX. (rus.).
8. Ferronskaya A.V., Korovyakov V.F. Gypsum binders in resource-saving systems of low-rise construction. *Dry Building Mixtures*. 2005; 3:56-57. (rus.).
9. Goncharov Yu.A., Buryanov A.F. Key factors for successful development of the gypsum materials industry. *Construction Materials*. 2013; 2:70-72. EDN PXESTF. (rus.).
10. Ferronskaya A.V. et al. *Gypsum in low-rise construction*. Moscow, Publishing house ASV, 2008. EDN QNNSHH. (rus.).
11. Babkov V.V., Latypov V.M., Lomakina L.N., Shigapov R.I. Modified gypsum binders with increased water resistance and gypsum expanded clay concrete wall blocks for low-rise housing construction based on them. *Construction Materials*. 2012; 7:4-8. EDN PFTJZL. (rus.).
12. Putsenko K., Balabanov V. Development and application prospects of dry gypsum-based construction mixtures. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015; 7(102):148-154. EDN UBLONF. (rus.).
13. Izotov V.S., Muhametrahimov A.D., Galautdinov A.R. Study of influence of active mineral additives on rheological and physical-mechanical properties of a gypsum-cement-pozzolanic binder. *Construction Materials*. 2015; 5:20-23. EDN TUHVEN. (rus.).
14. Chernysheva N.V. *Waterproof gypsum composite materials using technogenic raw materials : abstract of dis. ... cand. of technical sciences*. Belgorod, 2014; 22. EDN ZPPRAH. (rus.).
15. Aung K.N., Potapova E.N. Influence of the type of pozzolan additive on the composition and properties of gypsum-cement-pozzolan binder. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2022; 36(3):(252):7-9. EDN BXMIEA. (rus.).
16. Qais H., Bogdanov R., Morozova N., Mavlyuberdinov A., Suleymanova L. Influence of superplasticizing additives based on polycarboxylate ether on the technological and physical-technical properties of gypsum-cement-pozzolan binder. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2024; 8:20-28. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-20-28. EDN RXUQHT. (rus.).
17. Qais H.A., Morozova N.N. Influence of plasticizing additives on the properties of complex gypsum-

- cement-pozzolanic binder (experience of the republic of Yemen). *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024; 8(788):57-70. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-57-70. EDN OGSNHC. (rus.).
18. Khaliullin M.I., Nuriev M.I., Rakhimov R.Z., Gaifullin A.R. The influence of plasticizing additives on the properties of gypsum-cement-pozzolanic binder. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2015; 18(6):119-122. EDN RTPNGF. (rus.).
19. Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R., Lukmanova L.V. The effects of plasticizers on the basic properties of the gypsum cement-pozzolan binder based on low branded gypsum and technogenic raw materials. *News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2016; 4(38):382-387. EDN XAKONT. (rus.).
20. Galautdinov A.R., Mukhametrakhimov R.Kh. Improving water resistance quality of gypsum cement-pozzolan binder based on low-strength gypsum. *News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2016; 4(38):333-343. EDN XAKOLB. (rus.).
21. Qais H.A., Morozova N.N., Khokhryakov O.V. Comparative effectiveness of hydrophobizing and crystallizing additives effects on the properties of gypsum-cement-pozzolanic binder and concrete based on it. *Construction Materials*. 2024; 11:63-72. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-830-11-63-72. EDN CBGAYY. (rus.).
22. Mukhametrakhimov R., Galautdinov A., Gorbunova P., Gorbunova T. Water-resistant fiberreinforced gypsum cement-pozzolanic composites. *E3S Web of Conferences*. 2019; 138:01011. DOI: 10.1051/e3sconf/201913801011
23. Kurdyumova S.E., Potapova E.N. Influence of polypropylene fibers on the properties of gypsum-cement-pozzolanic binder. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2017; 31(3):(184):55-57. EDN ZRTOSV. (rus.).
24. Potapova E., Manushina A., Urbanov A. Effect of fibers on the properties of gypsum-cement-pozzolanic binder. *ZKG International*. 2017; 70(11):42-50. EDN XXLPXV.
25. Lesovik V.S., Urkhanova L.A., Fediuk R.S. Issues of improvement leaks fiber-reinforced concrete on composite binders. *ESSUTM Bulletin*. 2016; 1(58):5-10. EDN VQECDN. (rus.).
26. Kozhukhova M.I., Chulkova I.L., Kharkhardin A.N., Sobolev K.G. Estimation of application efficiency of hydrophobic water-based emulsions containing nanoandmicro-sized particles for modification of fine grained concrete. *Construction Materials*. 2017; 5:92-97. EDN YQGAPD. (rus.).
27. Zalipaeva O.A. Frost resistance and permeability of concrete on a mixture of porous and dense fillers. *Cherepovets State University Bulletin*. 2012; 3-2(41):7-10. EDN PCEDSR. (rus.).
28. Soongswang P., Tia M., Bloomquist D. Factors affecting the strength and permeability of concrete made with porous limestone. *ACI Materials Journal*. 1991; 88(4). DOI: 10.14359/1915
29. Ahmad S., Azad A.K., Loughlin K.F. Effect of the Key Mixture Parameters on Tortuosity and Permeability of Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2012; 10(3):86-94. DOI: 10.3151/jact.10.86
30. Winslow D.N., Cohen M.D., Bentz D.P., Snyder K.A., Garboczi E.J. Percolation and pore structure in mortars and concrete. *Cement and Concrete Research*. 1994; 24(1):25-37. DOI: 10.1016/0008-8846(94)90079-5
31. Halamickova P., Detwiler R.J., Bentz D.P., Garboczi E.J. Water permeability and chloride ion diffusion in portland cement mortars: Relationship to sand content and critical pore diameter. *Cement and Concrete Research*. 1995; 25(4):790-802. DOI: 10.1016/0008-8846(95)00069-o
32. Warda B.A., Munaz A.N. Effects of Aggregate Gradation on Water Permeability of Concrete. *Advanced Materials Research*. 2012; 488-489:248-252. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.488-489.248
33. Vankova N.R., Fomina A.E. Comparative experiment to determine the waterproofness of concrete by “wet spot” and “breathability” methods. *Construction and Geotechnics*. 2022; 13(1):96-105. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.08. EDN CFZRYX. (rus.).
34. Zakorshmennyy A.I. Comparison of the results of water resistance of concrete of underground structures in natural conditions, obtained using direct and indirect methods. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2007; 4:282-294. EDN KVOEEL. (rus.).
35. Antonyan A.A. On some features of modern methods for determining the waterproofness of concrete. *Concrete Technologies*. 2017;9-10(134-135):29-33. EDN YMQQFZ. (rus.).
36. Semenenko S.Y., Arkov D.P., Marchenko S.S. Express method for diagnosing water resistance of concrete structures of hydraulic structures. *News of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*. 2016; 3(43):213-220. EDN WWHGHF. (rus.).
37. Patent RU No. 2558824. *Method for determining water resistance of building materials* / Kesariyskiy A.G., Kondrashchenko V.I., Kondrashchenko E.V., Kentyuk A.V., Guseva A.Yu.; declared No. 2014116874/15 dated 28.04.2014; publ. 10.08.2015; 9. (rus.).
38. Patent RU No. 2795491. *Waterproofing structure* / Smirnov E.V., Zdanovich M.Ya., Urminsky D.G., Skopinov M.V., Rusakov M.I., Nosov O.A., Elkin A.A.; declared. No. 2022125751/22 dated 09.29.2022; published 05.04.2023; 7. (rus.).
39. Kassim M.M. The water permeability properties of re-vibrated lightweight concrete. *Journal of Metals, Materials and Minerals*. 2020; 30(1). DOI: 10.55713/jmmm.v30i1.575
40. Saif Allah S.J., Kassim M.M., Salman G.A. Concrete Mix Strength and Permeability with Various Supplementary Cementitious Materials. *E3S Web*

of Conferences. 2023; 427:02005. DOI: 10.1051/e3s-conf/202342702005

41. Hung V.V., Seo S.Y., Kim H.W., Lee G.C. Permeability and strength of pervious concrete according to aggregate size and blocking material. *Sustainability*. 2021; 13(1):426. DOI: 10.3390/su13010426

42. Qais H.A., Morozova N.N., Bogdanov A.N. Influence of the type and grain composition of sand on the properties of fine-grain concrete based on gypsum-cement-pozzolanic binder (experience of the republic of Yemen). *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024; 9(789):65-76. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-789-9-65-76. EDN ZFDWKE. (rus.).

43. Morozova N., Kais K., Gilfanov R., Morozov V. Influence of the fractional composition of the aggregate on the technological and strength properties of HCPV concrete. *AIP Conference Proceedings*. 2022; 2487:020009. DOI: 10.1063/5.0091723

44. Antonyan A.A. Comparative assessment of methods for determining the water resistance of concrete using the example of studying the influence of cement content. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2015; (2):44-47. (rus.).

Received January 14, 2025.

Adopted in revised form on January 20, 2025.

Approved for publication on February 13, 2025.

BIOTNOTES: **Hamza A. Qais** — research engineer; **University of Sana'a**; Sana'a, 13064, Republic of Yemen; SPIN-code: 9386-8763, ID RSCI: 868818, ORCID: 0009-0000-2805-7760; hamza.qais@mail.ru;

Nina N. Morozova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7867-4203; ninamor@mail.ru.

Contribution of the authors:

Hamza A. Qais — concept of research, article writing, research, illustrations.

Nina N. Morozova — scientific management, scientific text editing.

The authors declare that there is no conflict of interests.

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 626

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.559-568

Экспериментальные исследования волновых процессов в трубопроводной системе

Андрей Игоревич Ревин, Инна Валерьевна Бузякова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В целях проведения качественного и количественного анализа волновых процессов, а также верификации эффективности применения современного комплекса проведен ряд натурных испытаний. Данные экспериментальные исследования осуществлялись как в контролируемых лабораторных условиях, так и непосредственно в рамках производственных объектов реального сектора экономики.

Материалы и методы. Испытания в лабораторных условиях выполнялись на базе автономной некоммерческой организации «Курганский центр испытаний, сертификации и стандартизации трубопроводной арматуры» (АНО «КЦИСС») в г. Кургане, Курганской области, созданной для предоставления услуг в области оценки соответствия и подтверждения качества оборудования, изделий и технологий, в том числе для объектов использования атомной энергии, нефтехимических, нефтегазодобывающих, перерабатывающих производств и других опасных промышленных объектов и производств, а также общепромышленных объектов и производств, включая реализацию мероприятий по повышению безопасности данных объектов. В соответствии с п. 7 Решения «Концерна Росэнергоатом» от 26.06.2019 № Р 1.2.2.06.001.0435–2019 «О модернизации второго и третьего канала системы технической воды ответственных потребителей группы «А» энергоблока № 4 Калининской АЭС» и п. 6.10 условий действия лицензии № ГН-03-101-4122 от 20.10.2021 проведено измерение величин пульсаций давления с использованием разработанного комплекса мониторинга волновых процессов в трубопроводных системах технической воды ответственных потребителей группы «А» 4VF энергоблока № 4 Калининской АЭС в период переходного режима эксплуатации, связанного с выполнением автоматического ступенчатого пуска оборудования систем безопасности АЭС.

Результаты. Полученные результаты показывают, что, согласно проведенным экспериментам с применением разработанного комплекса мониторинга волновых процессов, изменение давления в трубопроводной системе имеет высокочастотный характер, что соответствует природе волновых процессов.

Выводы. Эксперименты в условиях различных нестационарных режимов в диагностируемых трубопроводах наглядным образом продемонстрировали работоспособность предлагаемого комплекса мониторинга волновых процессов в трубопроводной системе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидроудар, мониторинг волновых процессов, трубопроводная система, «Большая гидравлическая петля», пульсация давления, высокочастотные динамические процессы, контрольно-измерительные приборы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ревин А.И., Бузякова И.В. Экспериментальные исследования волновых процессов в трубопроводной системе // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 4. С. 559–568. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.559-568

Автор, ответственный за переписку: Инна Валерьевна Бузякова, buzyakova@mail.ru.

Experimental studies of wave processes in the pipeline system

Andrey I. Revin, Inna V. Buzyakova

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

ABSTRACT

Introduction. In order to conduct a qualitative and quantitative analysis of wave processes, as well as to verify the effectiveness of the modern complex, a number of field tests were conducted. These experimental studies were carried out both in controlled laboratory conditions and directly within the production facilities of the real sector of the economy.

Materials and methods. Laboratory tests were carried out on the basis of the Kurgan Centre for Testing, Certification and Standardization of Pipeline Fittings (ANO "KCISS"), an autonomous non-commercial organization in Kurgan, Kurgan region, established to provide services in the field of conformity assessment and quality assurance of equipment, products and technologies, including for nuclear energy facilities, petrochemical, oil and gas production, processing plants and other hazardous industrial facilities and productions, as well as general industrial facilities and productions, including the implementation

of measures to improve data security objects. In accordance with clause 7 of the Decision of “Rosenergoatom Concern” dated 26.06.2019 No. R 1.2.2.06.001.0435–2019 “The modernization of the second and third channels of the industrial water system of responsible consumers of Group A of Power unit No. 4 of Kalinin NPP” and clause 6.10 of the terms of license No. GN-03-101-4122 from 10/20/2021. Pressure pulsation values were measured using the developed wave process monitoring system in the process water pipeline systems of responsible consumers of Group “A” 4VF of power unit No. 4 of Kalinin NPP during the transition period of operation associated with the automatic step-by-step start-up of NPP safety equipment.

Results. The results show that, according to the experiments conducted using the developed monitoring system for wave processes, pressure changes in the pipeline system have a high-frequency character, which corresponds to the nature of wave processes.

Conclusions. Experiments under conditions of various non-stationary modes in the diagnosed pipelines have clearly demonstrated the operability of the proposed monitoring system for wave processes in the pipeline system.

KEYWORDS: hydraulic impact, monitoring of wave processes, pipeline system, “Large hydraulic loop”, pressure pulsation, high-frequency dynamic processes, control and measuring devices

FOR CITATION: Revин А.И., Бузякова И.В. Experimental studies of wave processes in the pipeline system. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(4):559-568. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.559-568 (rus.).

Corresponding author: Inna V. Buzyakova, buzyakova@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации трубопроводной системы неизбежно возникают пульсации давления рабочей среды, вызывающие гидродинамическое воздействие и возбуждающие механические вибрации трубопроводов, а также присоединенных механических конструкций. Вибрация трубопроводов и оборудования многократно возрастает на резонансных режимах, что приводит, в том числе, и к повышению погрешности контрольно-измерительных приборов [1].

Надежное и бесперебойное функционирование трубопроводных систем напрямую зависит от своевременного предотвращения возможных аварий и аварийных ситуаций, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации основного технологического оборудования [2–4]. Эффективная работа системы требует постоянного контроля за состоянием всех параметров трубопровода, а также оперативного реагирования на любые отклонения от нормы, чтобы минимизировать риски появления чрезвычайных происшествий, что обеспечивается благодаря системному подходу к оценке технического состояния, базирующегося на проведении как периодических обследований различными методами и средствами технического диагностирования, так и методами непрерывного мониторинга [5–8].

Значительный вклад в развитие теории волновых процессов в жидких средах внесли многие известные ученые. Одним из основоположников гидродинамики, который смог раскрыть механизм влияния волновых процессов в жидких средах на трубопровод и оборудование, был отечественный ученый Н.Е. Жуковский. Также в данной области вели свои исследования следующие ученые: И.Н. Аршеневский, А.И. Богомолова, А.Г. Гумеров, В.В. Берлин, А.И. Жакин, И.А. Чарный, Е.Е. Жмудь, И.С. Громека, К.Г. Асатур, В.Б. Галеев, Г.В. Аронович, М.В. Лурье, Л.Д. Ландау, Д.А. Фокс, Е.В. Вязунов, В.Л. Стритер, Р.И. Нигматулин, Е.Б. Уайли и др. [9]. Исследования, выполненные известными учеными Жаком и Пьером Кюри, внесли значительный вклад в развитие технологий и привели к существен-

ному прогрессу в области создания современных приборов, предназначенных для контроля сложных гидродинамических процессов [10, 11]. Результаты трудов ученых дали возможность разработать приборы, позволяющие более точно контролировать параметры транспортируемой по трубопроводам среды в условиях пульсирующего давления, что имеет важное значение во многих отраслях промышленности и научных исследованиях.

В последнее время защищены несколько диссертационных работ по схожим темам, авторы — О.Г. Капинос, С.В. Павлов, Н.В. Твардовская, В.Г. Гасенко, А.Ю. Верушин и др. Работы, посвященные вопросам непрерывного мониторинга технического состояния трубопроводных систем, немногочисленны и преимущественно сосредоточены на вопросах создания средств для мониторинга [12–17]. К примеру, технологии, используемые на промышленных предприятиях для обеспечения постоянного контроля за параметрами перекачиваемой среды в трубопроводах, не регистрируют параметры нестабильного потока среды в реальном времени, что напрямую сказывается на безопасности эксплуатации трубопроводов [18–20].

Цель эксперимента — получение осциллограммы давления в трубопроводе при закрытии обратного затвора, а также анализ полученных результатов и сравнение их с расчетными данными. Для достижения цели необходимо экспериментально определить величину ударного давления и скорость прохождения волны давления по испытательному стенду в условиях прямого гидравлического удара.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При разработке комплекса современного стендового оборудования, способного обеспечить имитацию всех основных негативных внешних факторов, воздействующих на трубопроводные системы в реальных условиях эксплуатации и безопасное достижение экстремальных и критических нагрузок на испытываемые изделия, применяемые в таких отраслях промышленности, как атомная и тепловая энергети-



Рис. 1. Стенд «Большая гидравлическая петля»

Fig. 1. The “Large hydraulic loop” stand

ки, нефтегазодобывающая и перерабатывающая, химическая и горнодобывающая, для данного центра было предусмотрено создание стенда ресурсных испытаний «Большая гидравлическая петля» (рис. 1), на котором предусматривалась апробация описываемого метода мониторинга волновых процессов.

Испытания осуществлялись в соответствии с программой и методикой испытаний трубопроводного оборудования, в рамках которой ставилась задача по изменению и учету параметров волнового процесса.

Для возникновения гидроудара в системе стенда на рабочем участке DN 300 был смонтирован обратный затвор DN 300. Закрытие запорного органа затвора происходило принудительно, по команде. При этом в системе стенда возникал гидроудар, величина которого зависела от скорости потока среды (расхода).

Величина давления гидроудара фиксировалась устройством мониторинга волновых процессов с записью на ПК.

В испытание входили следующие этапы:

- 1) установление стенда комплекса мониторинга волновых процессов;
- 2) установление открытого положения обратного клапана (создающего гидроудар);
- 3) заполнение стенда водой открытием задвижек на входе и выходе магистрали трубопровода;

- 4) кратковременный пуск насоса и проверка места соединений трубопровода стенда под давлением на герметичность;

- 5) выполнение настройки записи системы измерений;

- 6) включение насоса и установление в системе расхода, соответствующего скорости потока $v = 2$ м/с;

- 7) установление температуры воды 20 °С. Выдержка 3–5 мин. При постоянном расходе фиксируются показания комплекса мониторинга волновых процессов;

- 8) проведение срабатывания обратного клапана и фиксация (с записью ПК) величины возникшего гидроудара;

- 9) в данном режиме производится 3 срабатывания с остановкой насоса, перезапуском системы и интервалами выдержки не менее 5 мин.

В результате выполнено три эксперимента с последующим сравнением результатов при скоростях потока среды в трубопроводе 2 м/с. Результаты мониторинга показаны на рис. 2.

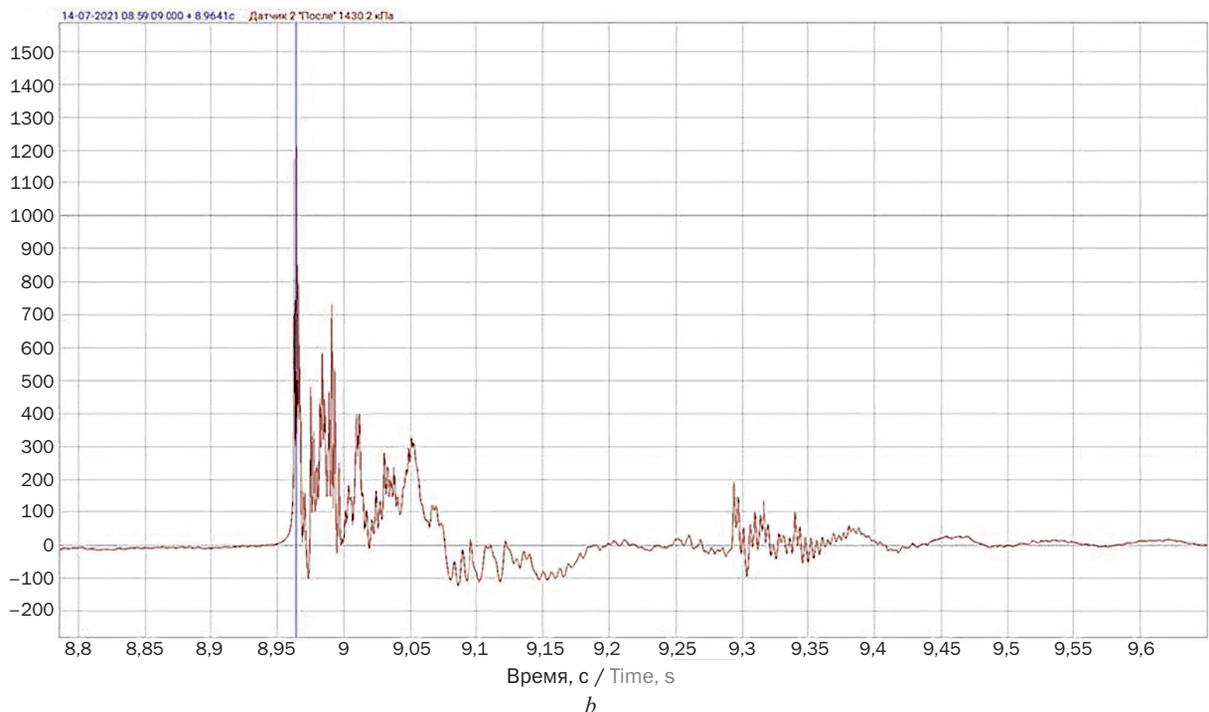
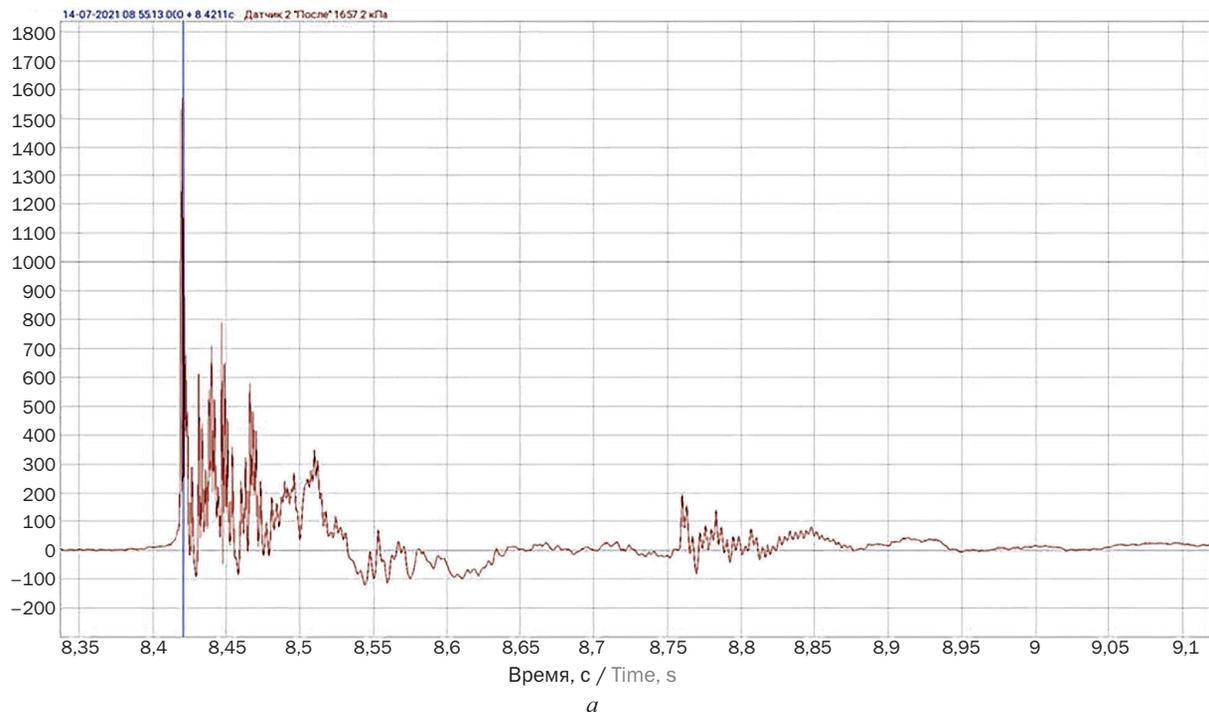
Измерения пульсаций давления в трубопроводных системах технической воды ответственных потребителей группы «А» 4VF выполнялись во время проведения АСП СБ-3 по программе 04.GX. ПМ.0008.69 «Программа комплексных испытаний систем безопасности энергоблока № 4 Калининской АЭС» на высотных отметках 6,6; 19,34; 33,4 м.

Отключение насосного агрегата произошло по сигналу обесточивания, а включение насосного агрегата — через 17 с. Изменение давления, зафиксированное приборами мониторинга, эксплуатируемыми на АЭС, приведено на рис. 3.

Результаты замеров максимальной пульсации давления во время осуществления АСП в трубопроводных системах технической воды ответственных потребителей группы «А» 4VF Калининской АЭС в момент пуска насосного агрегата, выполненные с помощью комплекса мониторинга волновых процессов, представлены на рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно проведенным экспериментам, на стенде «Большая гидравлическая петля» прослеживается повторяемость получаемых результатов (частота и амплитуда волнового процесса в каждом из трех экспериментов). Также видно, что графики отражают высокую скорость изменения давления по временной шкале в трубопроводе при неустановившемся режиме в условиях переходного процесса. В соответствии с анализом осциллограмм абсолютного давления в стенде «Большая гидравлическая



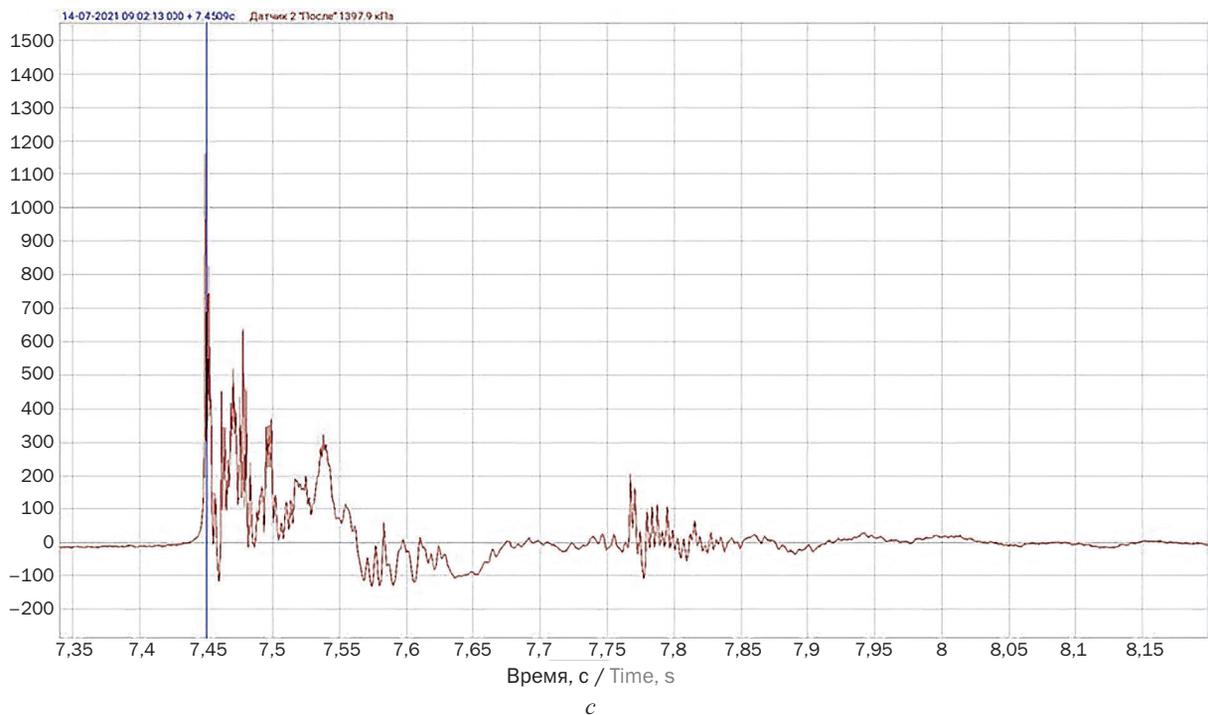


Рис. 2. Скорость среды $V = 2,0$ м/с: a — цикл № 1; b — цикл № 2; c — цикл № 3

Fig. 2. The velocity of the medium $V = 2.0$ m/s: a — cycle No. 1; b — cycle No. 2; c — cycle No. 3

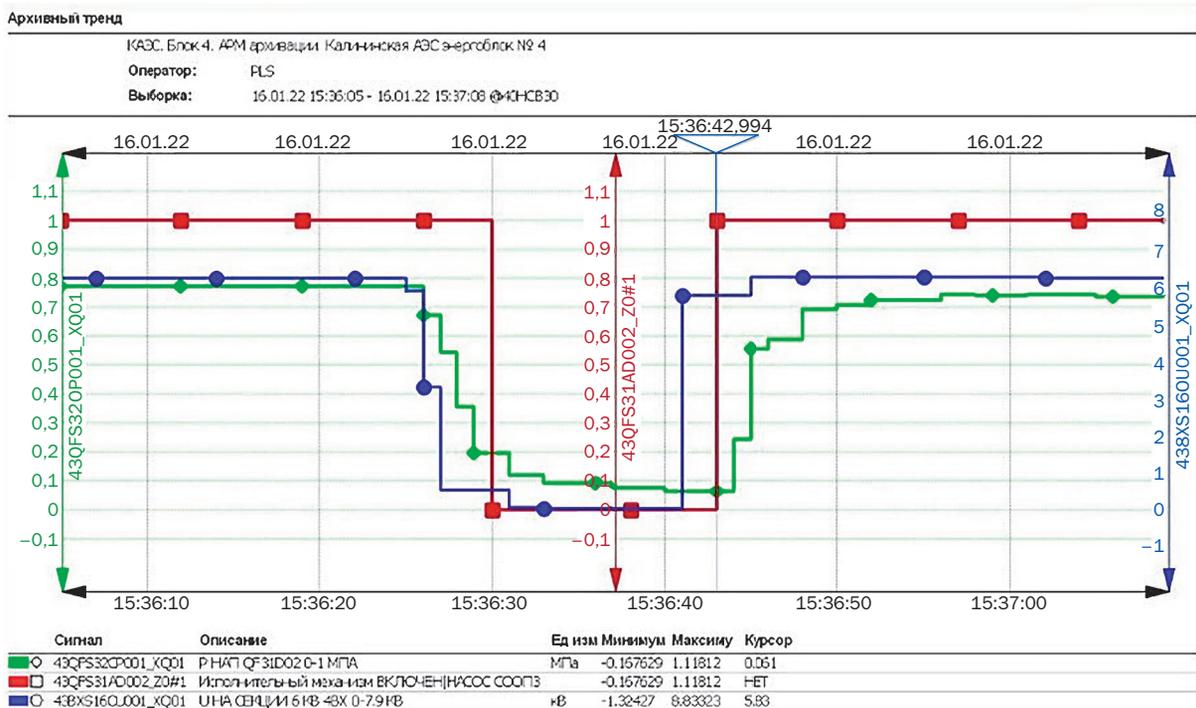


Рис. 3. Тренд отключения и включения насосного агрегата

Fig. 3. Trend of switching off and switching on the pump unit

петля» (рис. 1, 2, a, b) время прохождения волны на участке 10 м составило 0,007 с, соответственно скорость волны давления согласно формуле:

$$a = \frac{L}{\frac{t}{n} \cdot 1}$$

где L — длина трубопровода; t — время; n — количество волн, прошедших контрольную точку за единицу времени, имеет значение, равное 1428,57 м/с.

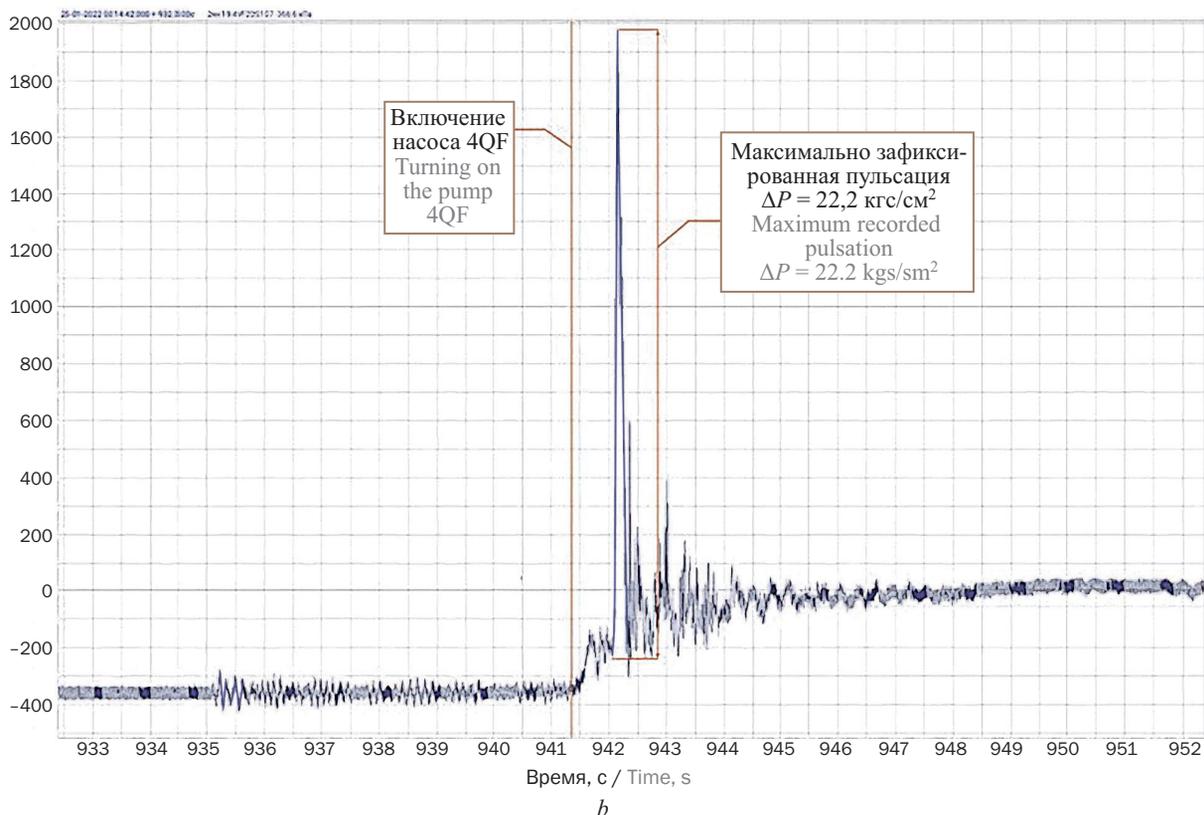
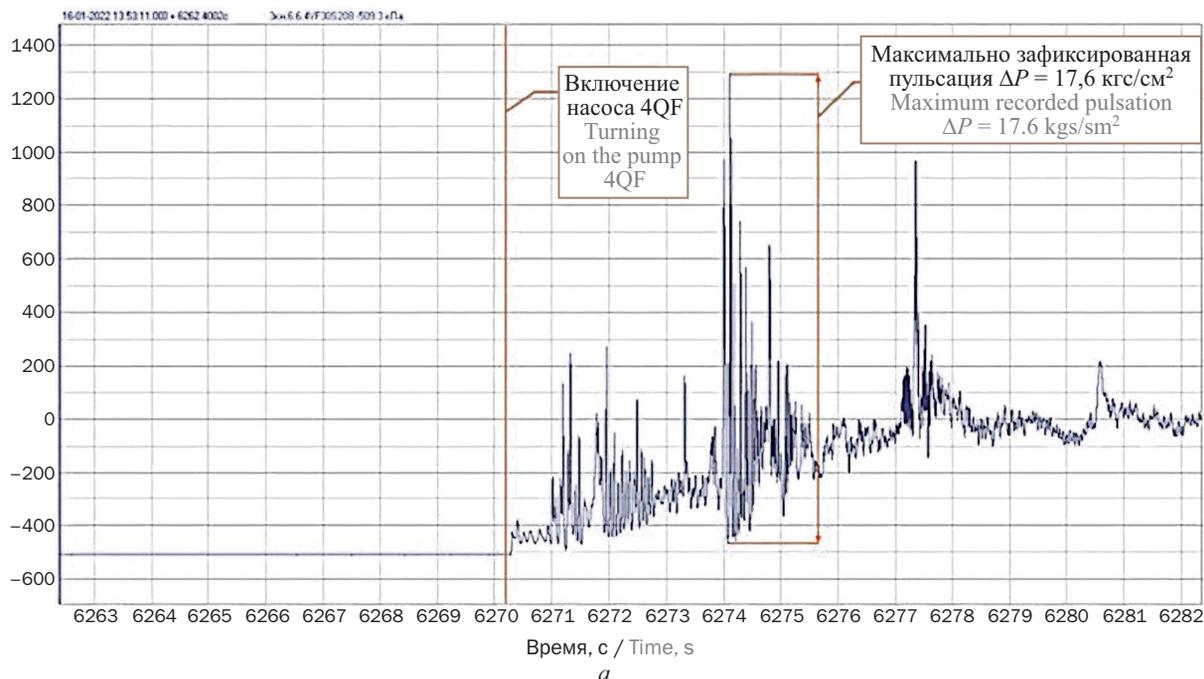
Также, согласно анализу графиков абсолютноного давления (рис. 2), количество измерений за период воздействия основной ударной волны (0,007 с),

произведенных комплексом мониторинга волновых процессов, составило 70 значений, что соответствует 10 000 измерений в секунду. Такая частота опроса подтверждает математическую модель скорости волны и полностью удовлетворяет требованиям для получения объективных данных при мониторинге волновых процессов.

Полученные результаты на Калининской АЭС показывают, что, согласно проведенным экспериментам с применением разработанного комплекса монито-

ринга волновых процессов, изменение давления в трубопроводной системе имеет высокочастотный характер, что соответствует природе волновых процессов.

Анализ результатов показал, что на энергоблоке № 4 Калининской АЭС в период переходного процесса режима эксплуатации, связанного с проведением автоматического ступенчатого пуска оборудования систем безопасности АЭС, наблюдается гидравлический удар, характеризующийся наличием пульсаций давления.



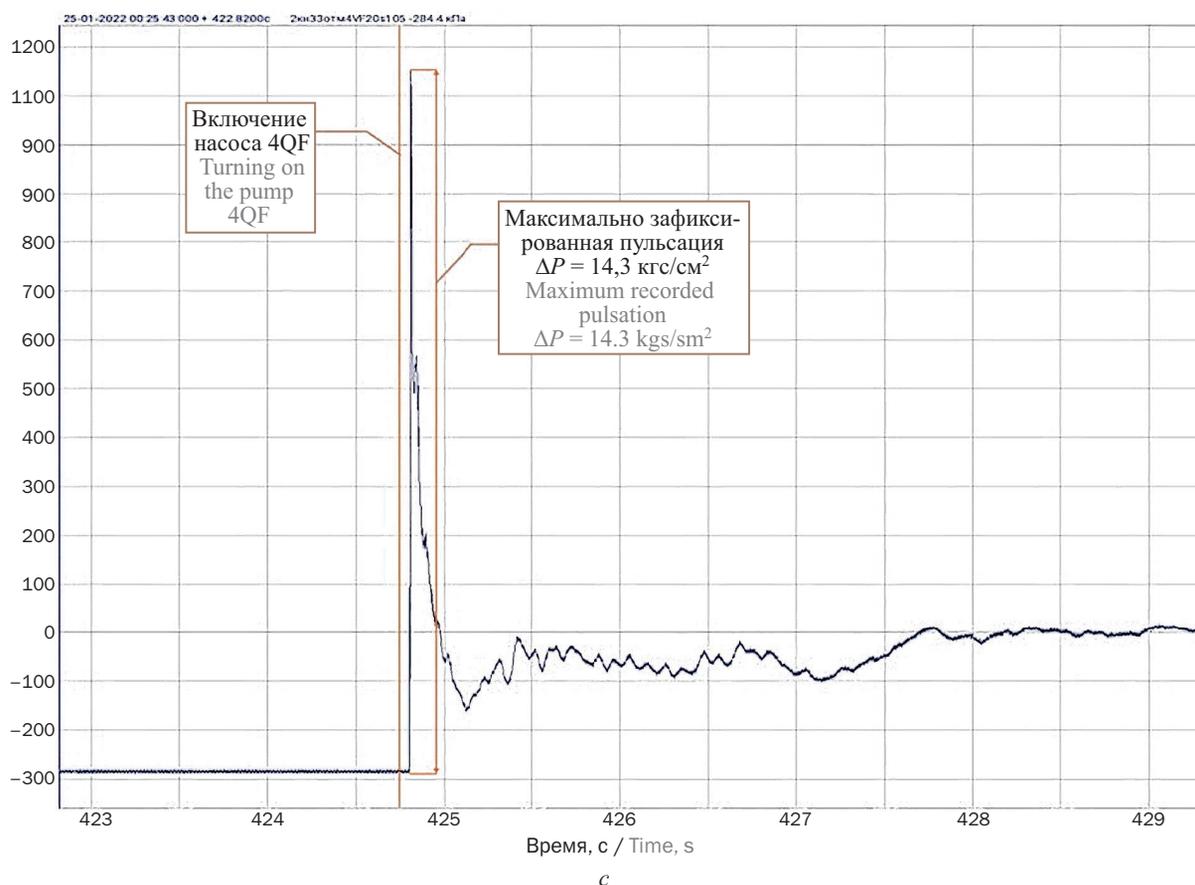


Рис. 4. Показания с датчика, расположенного на высотной отметке: a — 6,6 м; b — 19,34 м; c — 33,4 м

Fig. 4. Readings from a sensor located at an altitude of: a — 6.6 m; b — 19.34 m; c — 33.4 m

Однако сведения, полученные с разработанного комплекса, значительно отличаются от данных, полученных с приборов предприятия за счет своих уникальных параметров. На рис. 4 изображены тренды с разработанного комплекса, на котором зафиксирован пуск насоса, и они показывают наличие существенной пульсации давления в момент пуска насоса. Представленные результаты указывают на наличие волн давления, распространяющихся по трубопроводу со скоростью звука и превышающих данные с приборов предприятия.

Сравнительный анализ тренда от Калининской АЭС и графиков с разработанного комплекса мониторинга волновых процессов показывает, что применяемые, согласно требованиям существующей нормативной документации, средства мониторинга не удовлетворяют требованиям для получения объективных данных при мониторинге волновых процессов и не способны фиксировать в полном объеме изменение давления при переходных режимах.

Контроль за волновыми процессами не ведется по причине того, что средства мониторинга эти нагрузки не выявляют, в построении моделей технологических процессов информация о возникающих при эксплуатации гидродинамических нагрузках не используется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в ходе эксперимента результаты показали, что для точного мониторинга и своевременного предотвращения аварий на трубопроводах, в системах мониторинга необходимо применять технологии, способные улавливать высокочастотные динамические процессы, в том числе волны давления при пульсациях и гидроударах, так как они могут значительно повысить эффективность работы трубопроводных систем, позволяя предсказывать возможные аварии и принимать меры до того, как они произойдут. Примером служит применение данного комплекса на технологическом трубопроводе Калининской АЭС, оснащенной средствами визуального контроля и непрерывного мониторинга в соответствии с требованиями нормативных и проектных документов. А также дальнейшее сравнение полученных результатов с данными от разработанного метода и комплекса, который обеспечил необходимые параметры мониторинга для получения полной картины изменения давления в трубопроводе и смог зафиксировать волновой процесс, который неминуемо привел бы к разрушению трубопроводной системы. Вовремя выявленные волны давления позволили своевременно принять корректирующие меры по недопущению негативного сценария.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ревин А.И., Лядов Е.В., Бузякова И.В. История зарождения вопросов гидравлики // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16. № 3. С. 45. EDN QWABDG.
2. Ревин А.И., Бузякова И.В. Обеспечение экологической безопасности путем оптимизации требований к мониторингу гидродинамических процессов в трубопроводе // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16. № 5. EDN VICGYI.
3. Вадулина Н.В., Ачивакова Л.Р., Салимов А.О., Абдрахманова К.Н., Абдуллин Р.С. Обеспечение безопасности при пневмоиспытании трубопровода // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2017. № 4. С. 109–124. EDN ZELQQR.
4. Сачков К.В., Гареев Ф.Р., Шагитов Р.Р., Абдуллин Л.Р., Абдуллин Р.С. Оценка опасности эксплуатации нефтезаводского оборудования на основе показателя риска // Нефтепромышленное дело. 2010. № 9. С. 54–57. EDN MVLADR.
5. Ледовский Г.Н., Самоленков С.В., Кабанов О.В. Эффективность систем защиты оборудования нефтеперекачивающих станций при повышенных волнах давления // Записки Горного института. 2013. Т. 206. С. 99–102. EDN SDBPHF.
6. Lusyannikov A.V., Agafonov E.D., Egorov A.V., Lusyannikova N.N., Shram V.G., Kovaleva M.A. Algorithm for non-parametric modeling of the cutting process of dense snow formations with snow plow blade // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399. P. 044051. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044051
7. Иконников О.А., Агафонов Е.Д., Познякова В.Ю. Задачи диагностики и регулирования режимов работы энергоблока ОАО «Красноярская ГРЭС-2», г. Зеленогорск // Системы управления и информационные технологии. 2020. № 4 (82). С. 76–80. DOI: 10.36622/VSTU.2020.13.14.018. EDN PEYYFX.
8. Валитова К.А., Шамсутдинова И.И. Технологии, применяемые при гидравлическом разрыве пласта // Научно-исследовательский центр «Technical Innovations». 2021. № 3. С. 44–49. EDN QWXXTZ.
9. Слабожанин Г.Д., Слабожанин Д.Г. История развития гидравлики // Polish Journal of Science. 2020. № 31–1 (31). С. 50–56. EDN CHPMQO.
10. Рахматуллин Ш.И., Гумеров А.Г., Верушин А.Ю. О влиянии параметров клапана-гасителя на величину гидроудара в нефтепроводе // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2009. № 2 (76). С. 76–78. EDN KYFOAB.
11. Шагиев Р.Г., Верушин А.Ю. Моделирование гидравлических ударов в трубопроводах морских нефтеотгрузочных терминалов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2009. № 3 (77). С. 34–41. EDN KYPDJD.
12. Сачков К.В., Абдуллин Р.С. Оценка вероятности реализации аварий в нефтегазовом комплексе. Уфа, 2010. 16 с.
13. Хасан М.А., Самсонова В.А., Хусниров М.Х. Определение факторов оценки соответствия предприятий нефтепродуктообеспечения требованиям промышленной безопасности // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. № 1. С. 214–220. EDN RLEUFR.
14. Цыпленков С.В., Агафонов Е.Д. Концепция комплексной системы контроля энергоэффективности механизированной добычи нефти // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 4. С. 180–196. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-4-180-196. EDN UGXANT.
15. Капинос О.Г., Твардовская Н.В. Гидравлические удары в напорных трубопроводах при надземной прокладке // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20. № 1. С. 79–90. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-79-90. EDN IFFTBU.
16. Kapinos O.G., Tvardovskaya N.V. Risks of hydraulic shocks in pressure pipelines during above-ground laying in permafrost conditions // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 460. P. 07026. DOI: 10.1051/e3sconf/202346007026
17. Gasenko V.G., Demidov G.V., Il'in V.P., Shmakov I.A. Simulation of wave processes in a vapor-liquid medium // Numerical Analysis and Applications. 2012. Vol. 5. Issue 3. Pp. 213–221. DOI: 10.1134/s1995423912030032
18. Ляшенко А.Л., Морева С.Л., Кабанов О.В., Ледовский Г.Н. Моделирование гидравлического удара в трубопроводах // Актуальные проблемы гидролитосферы (диагностика, прогноз, управление, оптимизация и автоматизация) : сб. докл. 2015. С. 632–640. EDN UJZDCZ.
19. Капинос О.Г., Твардовская Н.В. Учет разрывов сплошности потока при гидравлических ударах на этапе проектирования напорных трубопроводов из полимерных материалов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19. № 1. С. 116–126. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-1-116-126. EDN AWSMWP.
20. Chernikov N.A., Tvardovskaya N.V., Okhremenko I.M. Influence of financing water protection measures in the field of transport on water quality of water bodies // BRICS Transport. 2023. Vol. 2. Issue 2. Pp. 1–6. DOI: 10.46684/2023.2.2

Поступила в редакцию 10 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 21 марта 2025 г.

Одобрена для публикации 25 марта 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Андрей Игоревич Ревин — аспирант; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; revin-ai@yandex.ru;

Инна Валерьевна Бузякова — кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры инженерных изысканий и геоэкологии; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; buzyakova@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Revin A.I., Lyadov E.V., Buzyakova I.V. History of hydraulic issues. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024; 16(3):45. EDN QWABDG. (rus.).
2. Revin A.I., Buzyakova I.V. Ensuring environmental safety by optimizing the requirements for monitoring hydrodynamic processes in the pipeline. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024; 16(5). EDN VICGYI. (rus.).
3. Vadulina N.V., Achivakova L.R., Salimov A.O., Abdrakhmanova K.N., Abdullin R.S. Ensuring safety at pneumotest of the pipeline. *Oil and Gas Business*. 2017; 4:109-124. EDN ZELQQR. (rus.).
4. Sachkov K.V., Gareev F.F., Shagitov R.R., Abdullin L.R., Abdullin R.S. Assessment of danger of petroleum plant equipment operation on the basis of risk indicator. *Oilfield Engineering*. 2010; 9:54-57. EDN MVLADR. (rus.).
5. Ledovskiy G.N., Samolenkov S.V., Kabanov O.V. Effectiveness of protection systems for oil pumping station equipment at elevated pressure waves. *Journal of Mining Institute*. 2013; 206:99-102. EDN SDBPHF. (rus.).
6. Lysyannikov A.V., Agafonov E.D., Egorov A.V., Lysyannikova N.N., Shram V.G., Kovaleva M.A. Algorithm for non-parametric modeling of the cutting process of dense snow formations with snow plow blade. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1399:044051. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044051
7. Ikonnikov O.A., Agafonov E.D., Poznyakova V.Yu. Problems of diagnostics and control of the power unit operating modes at JS “Krasnoyarskaya GRES-2”, Zelenogorsk. *Control Systems and Information Technologies*. 2020; 4(82):76-80. DOI: 10.36622/VSTU.2020.13.14.018. EDN PEYYFX. (rus.).
8. Valitova K.A., Shamsutdinova I.I. Technologies used in hydraulic fracturing. *Scientific Research Center “Technical Innovations”*. 2021; 3:44-49. EDN QWXXTZ. (rus.).
9. Slabozhanin G., Slabozhanin D. History of hydraulics development. *Polish Journal of Science*. 2020; 31-1(31):50-56. EDN CHPMQO. (rus.).
10. Rakhmatullin Sh.I., Gumerov A.G., Verushin A.Yu. Influence of damp valve parameters on the force of hydraulic impact in the oil pipeline. *Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2009; 2(76):76-78. EDN KYFOAB. (rus.).
11. Shagiev R.G., Verushin A.Yu. Surge simulation in marine oil-loading terminal pipelines. *Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2009; 3(77):34-41. EDN KYPDJD. (rus.).
12. Sachkov K.V., Abdullin P.C. *Assessment of the probability of accidents in the oil and gas complex*. Ufa, 2010; 16. (rus.).
13. Hasan M.A., Samsonova V.A., Khusniyarov M.Kh. The estimation factors definition of the conformity estimation of the petroleum product enterprises to the requirements of industrial safety. *Oil and Gas Business*. 2012; 1:214-220. EDN RLEUFR. (rus.).
14. Tsyplenkov S.V., Agafonov E.D. The concept of an integrated system of energy efficiency control of artificial oil lift. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021; 23(4):180-196. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-4-180-196. EDN UGXANT. (rus.).
15. Kapinos O., Tvardovskaya N. Hydraulic hits in penstocks with above-ground laying. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2023; 20(1):79-90. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-79-90. EDN IFFTBU. (rus.).
16. Kapinos O.G., Tvardovskaya N.V. Risks of hydraulic shocks in pressure pipelines during aboveground laying in permafrost conditions. *E3S Web of Conferences*. 2023; 460:07026. DOI: 10.1051/e3s-conf/202346007026
17. Gasenko V.G., Demidov G.V., Il'in V.P., Shmakov I.A. Simulation of wave processes in a vapor-liquid medium. *Numerical Analysis and Applications*. 2012; 5(3):213-221. DOI: 10.1134/s1995423912030032
18. Lyashenko A.L., Moreva S.L., Kabanov O.V., Ledovskiy G.N. Simulation of hydraulic shock in pipelines. *Actual problems of the hydrolithosphere (diagnostics, forecast, management, optimization and automation) : collection of reports*. 2015; 632-640. EDN UJZDCZ. (rus.).
19. Kapinos O., Tvardovskaya N. Accounting for flow discontinuities while water hammers at engineering stage of pressure pipelines made of polymeric materials. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2022; 19(1):116-126. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-1-116-126. EDN AWSMWP. (rus.).
20. Chernikov N.A., Tvardovskaya N.V., Okhremenko I.M. Influence of financing water protection measures in the field of transport on water quality of water bodies. *BRICS Transport*. 2023; 2(2):1-6. DOI: 10.46684/2023.2.2

Received March 10, 2025.

Adopted in revised form on March 21, 2025.

Approved for publication on March 25, 2025.

BIONOTES: **Andrey I. Revin** — postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; revin-ai@yandex.ru;

Inna V. Buzyakova — Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engineering Surveys and Geoecology; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; buzyakova@mail.ru.

Contribution of the authors: all the authors contributed to this article equivalently.

The authors declare that there is no conflict of interests.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 721.021.23

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.569-583

Методика аудита информационной модели здания для оценки реализации сценариев использования

Вероника Сергеевна Широкова, Марина Вячеславовна Петроченко,
Егор Маркович Мелехин

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);
г. Санкт-Петербург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные BIM-модели включают в себя обширный объем данных, охватывающих не только геометрические характеристики, но и наполненность атрибутивной информацией. Эти аспекты зачастую недоступны для многих участников процесса, и неопределенность в их понимании делает данные, собранные в ТИМ-моделях, малоэффективными. В таких случаях визуализация сведений ТИМ-модели становится ключевым стимулом для более осознанного моделирования, способствуя эффективному принятию решений и улучшению операционных процессов в строительных проектах.

Материалы и методы. Материалом исследования являются подготовленные цифровые информационные модели (ЦИМ) здания, база данных с информацией о корпусах и ссылками на фотофиксацию помещений кампуса университета. Для определения возможности реализации различных сценариев применения цифрового актива используется метод математического анализа. Этот метод позволяет рассчитать показатель информационной насыщенности данных, который необходим для принятия решения о возможности реализации того или иного сценария. Контролируемые параметры, представленные в математической модели, могут обладать различной степенью важности при формировании окончательной оценки. Для определения влияния вспомогательных параметров на итоговую оценку применяется метод экспертных оценок. Метод заключается в приписывании баллов по шкале от 1 до 10 в зависимости от значимости параметра.

Результаты. Разработана методика аудита наполнения модели атрибутивной информацией для актуальных сценариев использования ЦИМ на этапе эксплуатации. Выполнен сравнительный анализ проверки данных предлагаемой математической моделью и средствами BI. Результат анализа показал преимущества визуальной проверки в возможности комплексного анализа цифрового актива, включающего сведения различных типов.

Выводы. Методика проверки ЦИМ в целях реализации сценариев использования позволяет оценить, возможна ли реализация сценария применения для конкретной модели. При необходимости расширения набора информации о проекте, получения возможности для аналитики и решения задач в строительной отрасли используются отчеты Power BI. Тандем BIM-моделирования и системы BI способствует повышению эффективности в сокращении затрат и соблюдении сроков, а также открывает возможности внедрения машинного обучения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ТИМ-модель, визуализация данных, управленческие решения, информационные модели, Autodesk Revit, Power BI

Благодарности. Авторский коллектив выражает благодарность анонимным рецензентам научно-технического журнала по строительству и архитектуре «Вестник МГСУ».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Широкова В.С., Петроченко М.В., Мелехин Е.М. Методика аудита информационной модели здания для оценки реализации сценариев использования // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 4. С. 569–583. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.569-583

Автор, ответственный за переписку: Вероника Сергеевна Широкова, shirokova.vs@edu.spbstu.ru.

Methodology for auditing the building information model to assess the realization of use scenarios

Veronika S. Shirokova, Marina V. Petrochenko, Egor M. Melekhin

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Modern BIM models include a vast amount of data, covering not only geometric characteristics, but also full attribute information. These aspects are often inaccessible to many participants in the process, and the uncertainty in their understanding makes the data collected in TIM models ineffective. In such cases, visualization of TIM model data becomes a key stimulus for more informed modelling, contributing to better decision making and improved operational processes in construction projects.

Materials and methods. The research material is prepared digital information models of the building, a database with information about the buildings and links to photographic recordings of the university campus premises. To determine the possibility of implementing various scenarios for using a digital asset, a mathematical analysis method is used. This method allows you to calculate the information richness of data, which is necessary to make a decision about the possibility of implementing a particular scenario. The controlled parameters presented in the mathematical model may have varying degrees of importance when forming the final assessment. To determine the influence of auxiliary parameters on the final assessment, the method of expert assessments is used. The method consists of assigning points to each parameter by each expert on a scale from 1 to 10 depending on its importance.

Results. A methodology of auditing the filling of the model with attribute information for current scenarios for using DIM at the operational stage is developed. A comparative analysis of data verification using the proposed mathematical model and BI tools was performed. The result of the analysis showed the advantages of visual inspection in the possibility of a comprehensive analysis of a digital asset, including data of various types.

Conclusions. The methodology for checking an information model in order to implement use scenarios allows you to assess whether it is possible to implement a use scenario for a specific model. When it is necessary to expand the set of information about a project, gain the ability to analyze and solve problems in the construction industry, Power BI reports are used. The tandem of BIM modelling and BI systems increases efficiency in reducing costs and meeting deadlines, and also opens up the possibility of introducing machine learning.

KEYWORDS: TIM model, data visualization, management decisions, information models, Autodesk Revit, Power BI

Acknowledgements. The team of authors expresses gratitude to the anonymous reviewers of the scientific and technical journal of construction and architecture Vestnik MGSU.

FOR CITATION: Shirokova V.S., Petrochenko M.V., Melekhin E.M. Methodology for auditing the building information model to assess the realization of use scenarios. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(4):569-583. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.569-583 (rus.).

Corresponding author: Veronika S. Shirokova, shirokova.vs@edu.spbstu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Информационное моделирование зданий (BIM) стало мощным инструментом для управления сложными строительными проектами, способствуя улучшению коммуникации, расширению сотрудничества и повышению качества результатов проектов.

Разрабатываемые проектные цифровые информационные модели (ЦИМ) нацелены на создание эффективных и действенных сквозных информационных моделей (ИМ), объединяющих ключевые этапы жизненного цикла (ЖЦ) объектов, такие как изыскательские работы, проектирование, строительство и эксплуатация. Для реализации эффективных ИМ на начальном этапе разработки необходимо определить сценарии использования модели и установить основные требования к содержанию ЦИМ с точки зрения данных.

Одной из областей, где внедрение технологий информационного моделирования (ТИМ) по-прежнему требует совершенствования, является анализ данных. Качество информации, предоставляемой программным обеспечением (ПО) ТИМ, имеет решающее значение для принятия обоснованных решений, оптимизации рабочих процессов и улучшения результатов проекта.

Настоящее исследование проводится с целью оценки качества наполнения ИМ по различным сценариям использования с помощью метода математического анализа и оценки потенциала визуализации данных из моделей ТИМ для оптимизации управ-

ленческих решений на всех этапах проектирования, строительства и эксплуатации зданий.

Задачи исследования:

1. Сформулировать структуру данных ТИМ-модели.
2. Разработать математическую модель для определения показателя качества ТИМ-модели.
3. Оценить значимость параметров ТИМ-модели для реализации конкретных сценариев применения методом экспертной оценки.
4. Установить граничные значения показателя качества для установления степени достаточности данных ТИМ-модели в целях реализации определенного сценария использования.
5. Разработать методику контроля качества ТИМ-модели с точки зрения полноты насыщения атрибутивной информацией.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эффективное применение методов визуализации сведений в анализе ТИМ-моделей может расширить объем информации о проекте за счет различных источников данных [1, 2]. Тема данных модели тесно связана с методологией и процессами ТИМ. Для полного понимания материалов исследования следует иметь предварительное понимание сущности данных и их роли в ТИМ-моделях. На рис. 1 представлен график данных в течение ЖЦ проекта, содержащийся в стандарте ISO 19650 и руководстве UK BIM Framework, который представ-

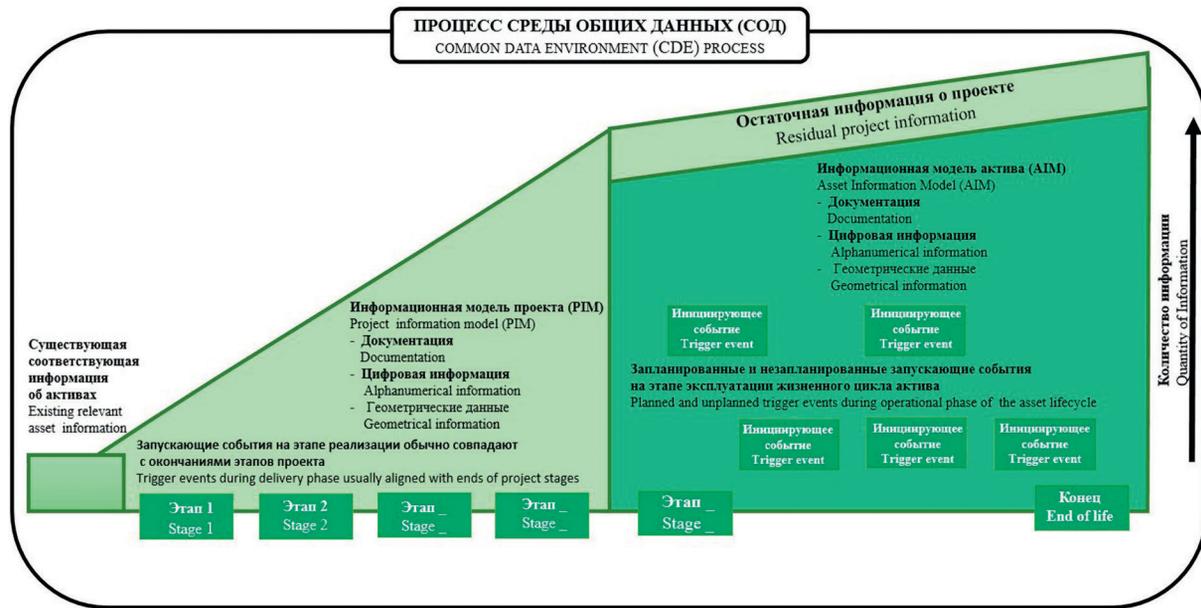


Рис. 1. График данных в течение жизненного цикла проекта

Fig. 1. Data graph over the project life cycle

ляет собой краткое изложение того, какие сведения собираются в строительных проектах¹ [3].

Развитие ТИМ-моделей неразрывно связано с постоянным накоплением и систематизацией данных на всех этапах ЖЦ проекта. Этот процесс позволяет создать цифровой актив объекта, который включает различные типы данных:

1. Структурированные данные внутри ТИМ-модели (свойства):

- 3D-модели: ЦИМ, содержащая геометрию, атрибутивную информацию, пространственные отношения и другую необходимую информацию;
- спецификации: информация о строительных материалах, системах и оборудовании.

2. Структурированные данные вне ТИМ-модели и связанные с ней (графики, некоторые требования и данные о продукции):

- данные о затратах: информация о затратах на проект, включая материалы, рабочую силу и оборудование;
- сведения планирования: календарные графики и отслеживания прогресса с течением времени;
- проектные данные: информация о проектных решениях, таких как выбор материалов и спецификаций компонентов.

3. Множество структурированных и неструктурированных данных, вне и не связанных с ТИМ-моделью (электронные письма, электронные таблицы, контракты, документы):

- проектная документация: хранение проектной документации, включая контракты, заказы на изменения и запросы информации;

¹ ISO 19650-2:2018. Organization of information about construction works. Information management using building information modelling. Part 2: Delivery phase of the assets, NEQ.

- исполнительная информация: сбор исполнительных данных, включая изменения, внесенные во время строительства и после строительства;

- документы:

- 1) технический паспорт здания;
- 2) выписки из ЕГРН и др.

При динамике развития проекта наблюдается увеличение объема данных, что сопровождается расширением использования рабочей силы в процессе обработки, представляя собой существенный ресурс проекта [4, 5].

Работа с большим объемом информации предполагает сложный и неотъемлемый процесс обработки, который играет ключевую роль в продуктивном использовании информационных ресурсов. Этот процесс (рис. 2) включает анализ, структурирование, очистку данных, оптимизацию с целью извлечения значимой информации.

Первым шагом в анализе и визуализации данных ТИМ является очистка и предварительная обработка данных. Процесс включает в себя удаление нерелевантных или дублирующихся сведений, исправление ошибок и преобразование данных в формат, пригодный для анализа [6, 7].

Одна из основных задач практически любой информационной системы — обработка собираемых, формируемых или хранимых данных. Для выполнения анализа с применением аналитического ПО достаточно статической модели IFC [8, 9].

В формате IFC хранятся данные о геометрии проекта и о ее информационной составляющей. В описание геометрии включается большое количество атрибутов и дополнительных свойств. Каждый атрибут несет в себе информацию об определенном объекте (IfcWall — стена, IfcBeam — балка, всего 25 структурированных элементов). Помимо инфор-

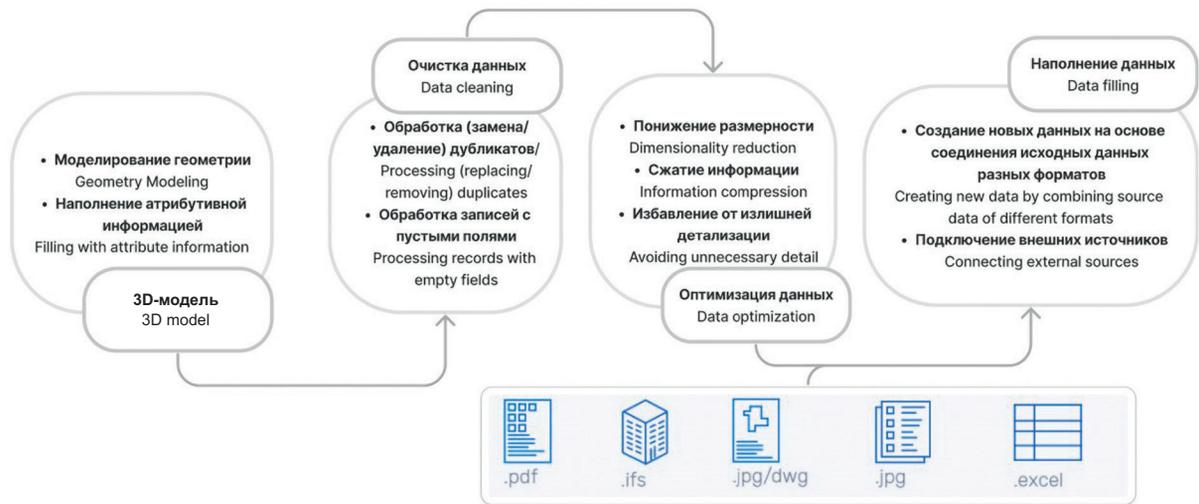


Рис. 2. Технологическая схема работы с данными

Fig. 2. Technological scheme of work with data

мации о самом объекте, может храниться информация и о его свойствах (Ifcmaterial — строительный материал), слоях (IfcPresentationLayerAssignment) и других характеристиках, которые не могут быть подвергнуты редактированию [10].

Понимание структуры файла IFC, описанной в стандарте, требуется для эффективной визуализации, анализа и проверки данных объекта на различных этапах ЖЦ. Это обеспечивает необходимую основу для использования ЦИМ в соответствии с заданными сценариями применения² [11, 12].

Сценарии использования играют ключевую роль в процессе ТИМ-моделирования, поскольку определение требований на ранних этапах проекта позволяет эффективно управлять ресурсами. Понимание целей и потребностей пользователей помогает сформировать модель, отвечающую конкретным требованиям, что, в свою очередь, способствует экономии трудовых ресурсов [13, 14].

Требования, необходимые для реализации сценариев использования, следует назначать в зависимости от уровней проработки ЦИМ, которые описаны в СП 333.1325800.2020. Опираясь на п. 5, каждому типу ЦИМ на каждом этапе ЖЦ соответствует определенный уровень проработки ЦИМ. Уровень проработки ЦИМ представляет собой совокупность требований к геометрической детализации и атрибутивному составу [14–16].

Рассмотрим наиболее часто используемые сценарии для моделей ЦИМ на разных этапах ЖЦ (табл. 1).

Для выполнения этих сценариев следует осуществлять проверку наполнения модели атрибутивной информацией.

Элементам определенного типа соответствуют конкретный набор атрибутов. Для удобства использования атрибуты собраны в группы, причем одному типу элемента может соответствовать набор групп атрибутов (по приложению Д в СП 333.1325800.2020³). При верификации ТИМ-модели с точки зрения атрибутивной информации необходимо основываться на количестве заполненных параметров (атрибутов) каждого элемента.

Одним из главных вопросов информационного менеджмента является процесс определения и описания потребности в информации таким образом, чтобы не было переизбытка или недостатка данных, что служит причиной снижения эффективности применения технологии информационного производства [17].

Уровень потребности в информации должен быть определен и описан для каждого информационного контейнера на каждом этапе ЖЦ актива, что означает необходимость описания информационных требований:

- минимальный объем геометрической информации, необходимый в составе графических моделей;
- минимальный объем атрибутивной информации, необходимой в составе данных об активе;
- минимальный объем информации, необходимый в составе документации.

При выявлении уровня потребности в информации выделяют две основные категории: минимально необходимую информацию и вспомогательную.

Атрибуты, отсутствие заполнения которых означает полную непригодность ЦИМ к использова-

² ISO 16739-1:2018. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. Part 1: Data schema, IDT.

³ СП 333.1325800.2020. Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла. М., 2020. 225 с.

Табл. 1. Сценарии использования информационной модели

Table 1. Scenarios for using the information model

Обозначение сценария использования Use case designation	Наименование сценария использования Use case name	Описание сценария использования Description of the use case
В		<i>Проектирование / Design</i>
B1	Анализ объемно-планировочных решений здания Analysis of the building's spatial planning solutions	Анализ распределения площадей по различным уровням и функциональному назначению относительно общей площади здания Analysis of the distribution of areas by different levels and functional purpose relative to the total area of the building
B2	Визуализация 3D-модели Visualization of a 3D-model	Интерактивная 3D-модель здания позволяет получить графическое отображение объемной модели здания с видимостью всех ее элементов An interactive 3D-model of a building allows you to get a graphical representation of a three-dimensional model of a building with visibility of all its elements
B3	Проверка проектных решений Verification of design solutions	Проверка соответствия планировок здания техническим нормам / Checking the compliance of building layouts with technical standards
С		<i>Строительство / Construction</i>
C1	Оценка стоимости Cost estimation	Определение объемов и затрат на каждый материал, используемый в строительстве. Выявление и анализ материалов, вносящих значительный вклад в общую стоимость проекта / Determination of volumes and costs for each material used in construction. Identification and analysis of materials that make a significant contribution to the total cost of the project
C2	Контроль качества строительства / Construction quality control	Возможность просмотра календарного графика с анализом выполнения работ в запланированные сроки / The ability to view a calendar schedule with an analysis of the work performed on schedule
Д		<i>Эксплуатация / Exploitation</i>
D1	Управление и контроль площадных ресурсов здания Management and control of building area resources	Мониторинг использования пространств с отслеживанием статусов занятости каждого помещения / Monitoring the use of spaces with tracking the occupancy status of each premises
D2	Управление материально-техническим имуществом Material and technical property management	Определение материальных точек с привязкой к помещениям / Determination of material points with reference to premises
D3	Оценка энергоэффективности Energy efficiency assessment	Отслеживание общего энергопотребления здания за счет датчиков. Анализ данных с целью снижения потребления энергии и повышения эффективности / Track the total energy consumption of the building through sensors. Data analysis to reduce energy consumption and improve efficiency
D4	Оценка освещенности помещений / Assessment of indoor lighting	Определение зон, в которых требуется дополнительная регулировка освещения / Identify areas where additional lighting adjustment is required

нию в рамках конкретных сценариев, назовем критическими. Параметры, несущие информативное значение, но не обязательные при использовании модели, — вспомогательными [18].

Для математического описания связи атрибутов модели, необходимых для реализации сценариев использования с оценкой качества наполнения модели, вводятся следующие входные параметры, описывающие исходные данные:

n — количество типов элементов в модели;

$j = 1, 2, \dots, n$ — индекс типа элемента;

z_j — количество элементов типа j ;

$k = 1, 2, \dots, z_j$ — индекс элемента типа j ;

b — количество сценариев использования;

$\sigma = 1, 2, \dots, b$ — индекс сценария использования;

$R_{jk\sigma}^{crit}$ — количество критических атрибутов для элемента k типа j сценария использования σ ;

$R_{jk\sigma}^{exp}$ — количество вспомогательных атрибутов для элемента k типа j сценария использования σ ;

$r_{jk\sigma}^{crit}$ — количество заполненных критических атрибутов для элемента k типа j сценария использования σ ;

$r_{jk\sigma}^{exp}$ — количество заполненных вспомогательных атрибутов для элемента k типа j сценария использования σ ;

$m = 1, 2, \dots, r_{jk\sigma}^{exp}$ — индекс вспомогательного атрибута для элемента k типа j сценария использования σ .

Оценка происходит от частного к общему и включает следующие шаги:

1. Проверка заполнения критических атрибутов отдельных элементов.

2. Оценка качества по полноте заполнения вспомогательных атрибутов отдельных элементов.

3. Оценка качества насыщения вспомогательных атрибутов по элементам одного типа (окна, двери и т.д.).

4. Оценка качества заполненности атрибутов всей модели.

Описание проверки заполнения критических атрибутов и оценки насыщения элемента вспомогательными атрибутами происходит по следующей математической зависимости:

$$\theta_{jk\sigma} = \left[\frac{r_{jk\sigma}^{crit}}{R_{jk\sigma}^{crit}} \right] \cdot \sum_{m=1}^{R_{jk\sigma}^{exp}} (r_m^{exp} \cdot v_m), \quad (1)$$

где $\theta_{jk\sigma}$ — относительный показатель качества по полноте заполнения атрибутов элемента k типа элемента j сценария использования σ ; ($\theta_{jk\sigma} \in [0; 1]$); v_m — весовой коэффициент, складывающийся из экспертной оценки значимости параметра p в итоговой модели.

Следует отметить, что при незаполненности хотя бы одного параметра из категории «критические» оценка элемента k аннулируется ($\theta_{jk\sigma} = 0$), так как невозможно реализовать сценарий использования.

Контролируемые параметры, представленные в математической модели, могут обладать различной степенью важности при формировании окончательной оценки. Частным примером такого параметра является оценка важности атрибута m для конкретного сценария использования. Значимость конкретного атрибута можно установить с помощью весовых коэффициентов. Весовой коэффициент устанавливает предпочтение критерия i над другими критериями в количественном измерении.

Распространенный и удобный способ определения весовых коэффициентов — это метод экспертных оценок. Он имеет несколько вариаций, из которых чаще всего выделяют метод приписывания баллов, как оптимальный при работе с большим количеством параметров. Метод заключается в приписывании баллов каждому параметру каждым экспертом по определенной шкале (как правило, от 1

до 10). Параметры могут оцениваться как целыми, так и дробными значениями в выбранной шкале.

Весовой коэффициент рассчитывается по формуле:

$$f_{dm} = \frac{c_{dm}}{R_{jk\sigma}^{exp}}, \quad (2)$$

$$\sum_{m=1} c_{dm}$$

где f_{dm} — вес атрибута m , определенный экспертом d ; $d = 1, 2, \dots, h$ — индекс эксперта; h — количество экспертов; c_{dm} — балл эксперта d по атрибуту m .

Итоговые весовые коэффициенты модулей определяются по формуле:

$$v_m = \frac{\sum_{d=1}^h f_{dm}}{R_{jk\sigma}^{exp} \sum_{m=1}^h \sum_{d=1}^h f_{dm}}. \quad (3)$$

Причем сумма весовых коэффициентов должна быть равна единице:

$$\sum_{m=1}^{R_{jk\sigma}^{exp}} v_m = 1. \quad (4)$$

Следующий этап оценки по типу элементов описывается формулой:

$$\theta_{j\sigma} = \frac{\sum_{k=1}^{z_j} \theta_{jk\sigma}}{z_j}, \quad (5)$$

где $\theta_{j\sigma}$ — относительный показатель качества насыщения вспомогательными атрибутами типа элементов j ($\theta_{j\sigma} \in [0; 1]$); $\theta_{jk\sigma}$ — относительный показатель качества насыщения модели эксплуатационными атрибутами для реализации сценария использования происходит по зависимости ($\theta_{j\sigma} \in [0; 1]$).

$$\theta_{\sigma} = \sum_{j=1}^{n_i} \theta_{j\sigma} \cdot \omega_j, \quad (6)$$

где ω_j — весовой коэффициент типа элементов j относительно общего числа элементов модели:

$$\omega_j = \frac{z_j}{\sum_{j=1}^n z_j}. \quad (7)$$

Причем:

$$\sum_{j=1}^{n_i} \omega_j = 1. \quad (8)$$

После определения итогового показателя качества θ_{σ} ТИМ-модели необходимо проанализировать его значение относительно заданных граничных условий.

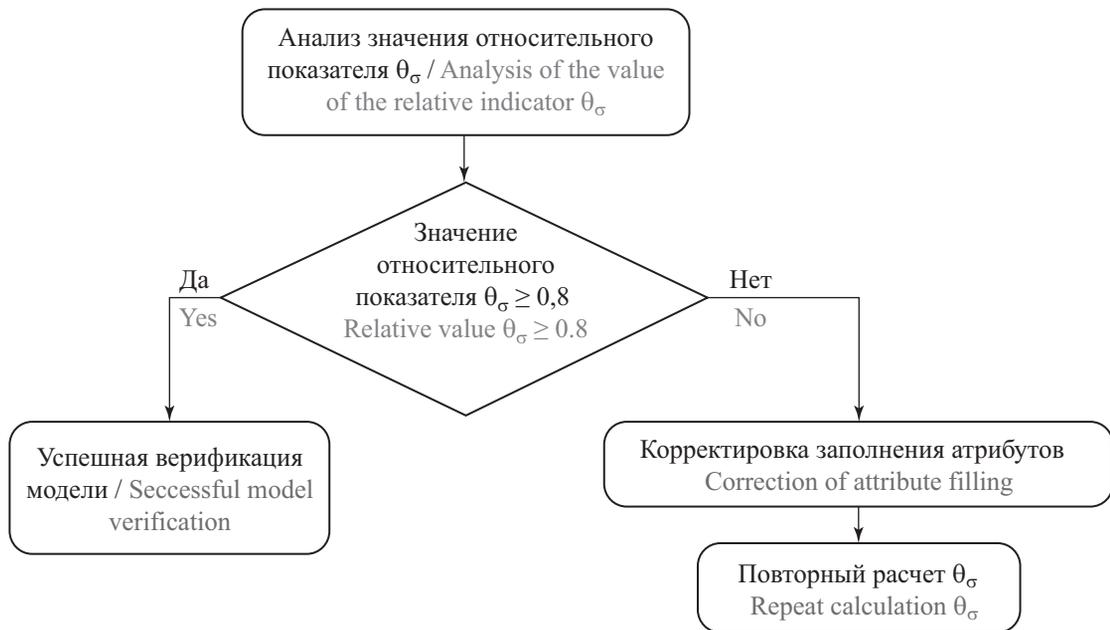


Рис. 3. Анализ значения показателя наполненности ТИМ-модели для конкретного сценария использования

Fig. 3. Analysis of the TIM model fullness indicator value for a specific use case

По методике устанавливаются следующий порядок анализа итогового значения θ_σ и его граничные значения:

- при значениях $\theta_\sigma \geq 0,8$ модели присваивается статус «обеспечивающей необходимый уровень наполненности модели информацией для реализации сценария использования σ »;
- при значениях $\theta_\sigma < 0,8$ модель получает статус «не обеспечивающей необходимый уровень наполненности модели информацией для реализации сценария использования σ » и отправляется на полную корректировку отраженной атрибутивной ин-

формации с последующим повторным расчетом относительного показателя качества типа элементов.

Алгоритм анализа значения итогового показателя качества ВИМ-модели представлен на рис. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования для проведения аудита выбран учебный корпус Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Модель корпуса (рис. 4) содержит 5080 элементов, 11 220 м² общей площади.

Рассмотрим применение разработанной методики оценки достаточности данных в рамках вы-

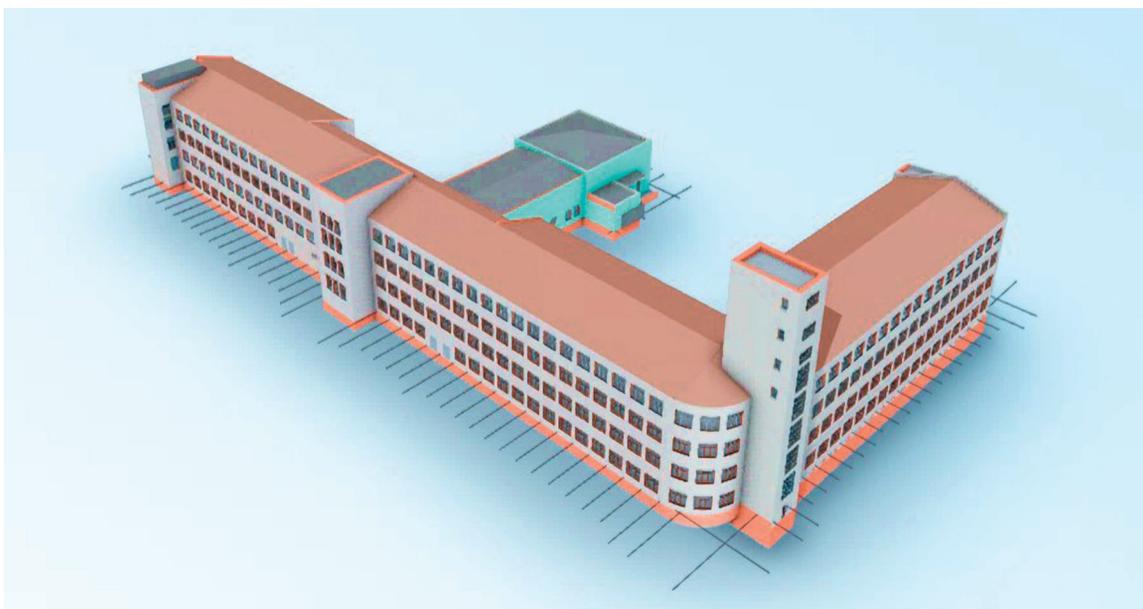


Рис. 4. Цифровая информационная модель корпуса

Fig. 4. Digital information model of the case

Табл. 2. Требуемые параметры для сценария «Управление материально-техническим имуществом»

Table 2. Required parameters for the Inventory Management use case

Тип атрибутов Attributes type	Критические атрибуты Critical attributes	Вспомогательные атрибуты Auxiliary attributes	Параметр вспомогательного атрибута Parameter of auxiliary attribute
Атрибуты помещений Premises attributes	ID помещения Premises ID	Высота потолка / Ceiling height	r_1^{exp}
	Название / Name	Функциональное назначение Functional purpose	r_2^{exp}
	Фактический номер Actual number	Целевое использование Intended use	r_3^{exp}
	Фактическая площадь Actual area	–	–
Атрибуты из базы данных Attributes from the database	Номер группы помещений по техническому паспорту Premises group number according to the Technical passport	Код подразделения Department code	r_4^{exp}
	Номер помещений по техническому паспорту Premises number according to the Technical Passport	Фотобанк помещения Photo bank of the premises	r_5^{exp}
	Площадь помещений по техническому паспорту The area of the premises according to the Technical Passport	Техническое состояние Technical condition	r_6^{exp}
	Подразделение / Department	Статус / Status	r_7^{exp}
	–	Материальные точки Material points	r_8^{exp}

Табл. 3. Экспертные оценки вспомогательных параметров

Table 3. Expert assessments of auxiliary parameters

Эксперты Experts	Баллы по модулям / Points by module								Сумма Sum
	r_1^{exp}	r_2^{exp}	r_3^{exp}	r_4^{exp}	r_5^{exp}	r_6^{exp}	r_7^{exp}	r_8^{exp}	
1	1	6	4	8	7	7	8	7	48
2	3	4	4	5	5	8	5	8	42
3	3	4	2	8	4	7	7	6	41
4	4	5	3	9	6	9	7	8	51
5	5	2	3	8	5	9	7	9	48
6	4	6	6	9	5	9	6	9	54
7	3	4	4	7	5	8	7	8	46
8	3	4	2	7	4	8	7	7	42
9	4	3	5	8	6	7	7	8	48
10	2	3	5	8	6	9	8	8	49
Сумма / Sum	32	41	38	77	53	81	69	78	–

полнения сценария использования «Управление материально-техническим имуществом».

Критические и вспомогательные атрибуты, необходимые для выполнения сценария использования, представлены в табл. 2.

Незаполненность хотя бы одного критического параметра аннулирует значение относительного показателя качества по полноте наполнения атрибутов элемента по причине невозможности реализации сценария использования.

Влияние вспомогательных параметров на итоговую оценку рассчитывается с помощью весовых

коэффициентов по методу экспертных оценок. В комиссию по оценке входили 10 экспертов строительных компаний с опытом работы в сфере информационного моделирования 1–3 года — 5 человек, 3–7 лет — 3 человека, 7 и более лет — 2 человека. Таким образом, 10 экспертов произвели независимую оценку по 8 критериям по 10-балльной шкале.

Результаты опроса по необходимости применения вспомогательных атрибутов при реализации конкретного сценария использования представлены в табл. 3.

Табл. 4. Весовые коэффициенты атрибутов категории «Помещения»

Table 4. Weighting coefficients of attributes of the category “Premises”

Эксперты Experts	Вес по модулям / Weight by module								Сумма Sum
	r_1^{exp}	r_2^{exp}	r_3^{exp}	r_4^{exp}	r_5^{exp}	r_6^{exp}	r_7^{exp}	r_8^{exp}	
1	0,021	0,125	0,083	0,167	0,146	0,146	0,167	0,146	1
2	0,071	0,095	0,095	0,119	0,119	0,190	0,119	0,190	1
3	0,073	0,098	0,049	0,195	0,098	0,171	0,171	0,146	1
4	0,078	0,098	0,059	0,176	0,118	0,176	0,137	0,157	1
5	0,104	0,042	0,063	0,167	0,104	0,188	0,146	0,188	1
6	0,074	0,111	0,111	0,167	0,093	0,167	0,111	0,167	1
7	0,065	0,087	0,087	0,152	0,109	0,174	0,152	0,174	1
8	0,071	0,095	0,048	0,167	0,095	0,190	0,167	0,167	1
9	0,083	0,063	0,104	0,167	0,125	0,146	0,146	0,167	1
10	0,041	0,061	0,102	0,163	0,122	0,184	0,163	0,163	1
Сумма / Sum	0,68	0,87	0,81	1,64	1,13	1,73	1,47	1,66	10
Весовой коэффициент v_m Weighting coefficient v_m	0,068	0,087	0,081	0,164	0,113	0,173	0,147	0,166	1

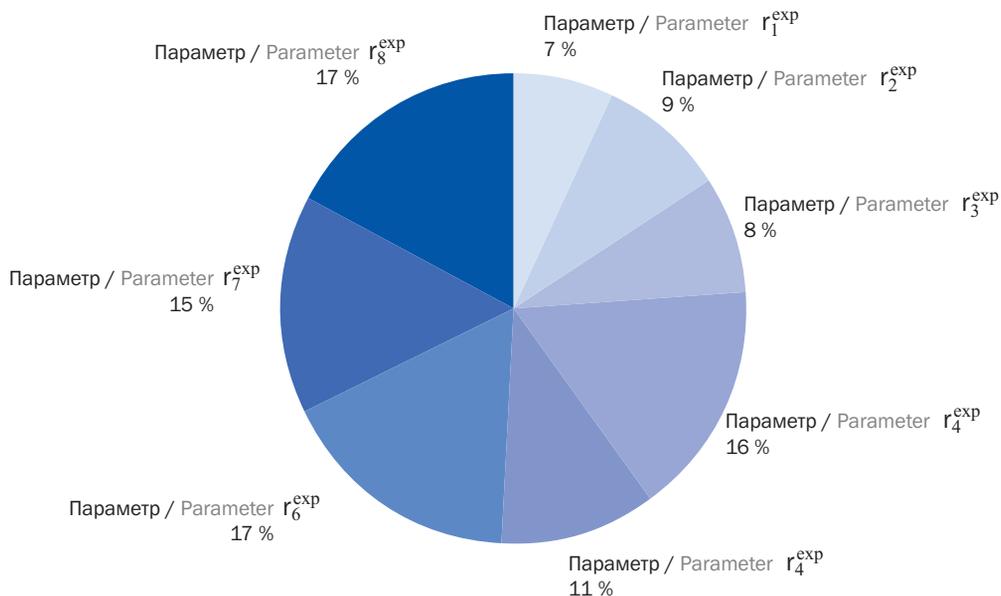


Рис. 5. Весовые коэффициенты вспомогательных параметров

Fig. 5. Weighting coefficients of auxiliary parameters

В результате вычислений по формулам (2), (3) происходит формирование нормированных значений оценок вспомогательных параметров, соответствующих интервалу [0; 1], в которых минимальное значение соответствует наименее предпочтительному результату верификации параметра, а максимальное — наиболее предпочтительному. Результаты представлены в табл. 4 и на рис. 5.

Вычисление весового коэффициента необходимо для расчетов относительного показателя качества по полноте заполнения атрибутов элементов категории «Помещения» сценария использования «Управление материально-техническим имуществом», по формуле (1). Итоговое значение относительного показателя качества модели сведено в табл. 5.

В соответствии с данными табл. 5 значительное количество помещений не прошли проверку по причине незаполнения критических параметров, что существенно сказывается на итоговом значении относительного показателя $\theta_{js} = 0,013$.

Для определения общей оценки наполненности ЦИМ модели необходим расчет весовых коэффициентов, отражающих долю количества элементов выбранного типа относительно количества элементов в пределах модели. В рамках выбранного сценария использования проверка осуществляется для элементов категории «Помещения».

Коэффициенты ω_j вычисляются по формуле (7) с проверкой по условию (8). Расчет весовых коэффициентов по всем типам элементов представлен в табл. 6.

Табл. 5. Относительный показатель качества типа элементов «Помещения»

Table 5. Relative quality indicator of the “Premises” element type

$\theta_{j\sigma}$	z_j	$\theta_{jk\sigma}$	$r_{jk\sigma}^{crit}$	$R_{jk\sigma}^{crit}$	$\sum_{m=1}^{R_{jk\sigma}^{exp}} (r_m^{exp} \cdot \upsilon_m)$	$R_{jk\sigma}^{exp}$	Уровень Level
0,013	21	0,686	8	8	0,686	8	Подвал Basement
	2	0	7	8	0,522	8	Подвал Basement
	1	0,454	8	8	0,454	8	Подвал Basement
	77	0,686	8	8	0,686	8	Этаж 1 Floor 1
	17	0	7	8	0,522	8	Этаж 1 Floor 1
	76	0,686	8	8	0,686	8	Этаж 2 Floor 2
	12	0	7	8	0,522	8	Этаж 2 Floor 2
	36	0,686	8	8	0,686	8	Этаж 3 Floor 3
	11	0	7	8	0,522	8	Этаж 3 Floor 3
	46	0,686	8	8	0,686	8	Этаж 4 Floor 4
	11	0	7	8	0,522	8	Этаж 4 Floor 4

Табл. 6. Коэффициенты по количеству элементов в модели

Table 6. Coefficients by the number of elements in the model

Коэффициент по количеству элементов в модуле ω_j Coefficient by the number of elements in a module ω_j	Тип элементов Element type	Количество элементов, необходимых для сценария использования $z_{j\sigma}$ Number of elements required for the use case $z_{j\sigma}$	Количество элементов в типе z_j Number of elements in type z_j
0	Корпус Building	0	1
0	Этаж Floor	0	5
1	Помещение Room	310	310
0	Крыша / Roof	0	1
0	Стена / Wall	0	245
0	Плита / Slab	0	6
0	Лестничная площадка Staircase	0	6
0	Окно Window	0	120
0	Дверь Door	0	203
0	Балка Beam	0	0
1		Сумма весовых коэффициентов Sum of weighting coefficients	

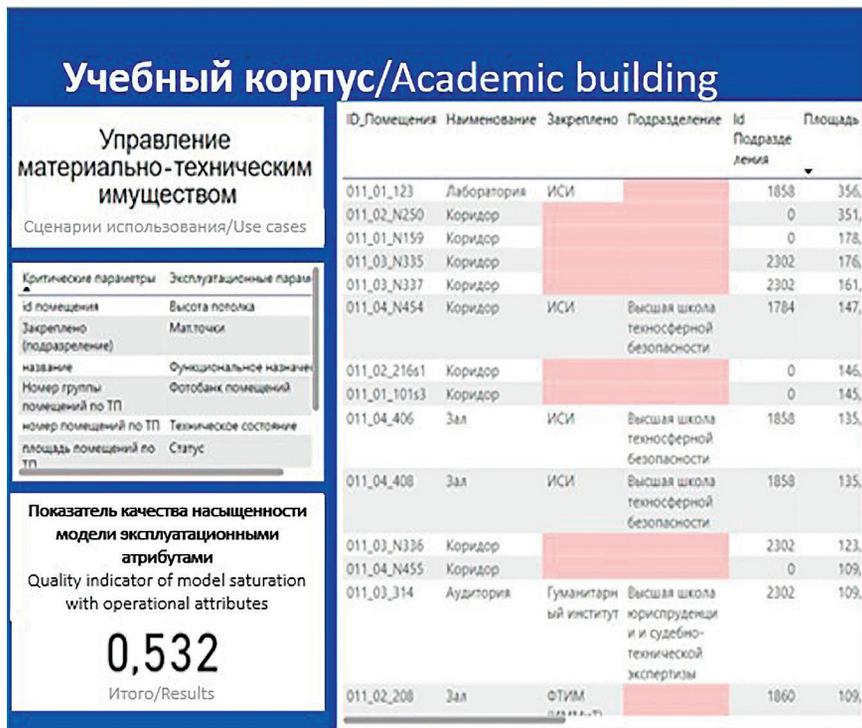


Рис. 6. Аналитический отчет о заполнении параметров и расчете итогового показателя достаточности данных в рамках выполнения сценария использования

Fig. 6. Analytical report on filling in the parameters and calculating the final indicator of data sufficiency within the framework of the use case scenario

Результатом расчетов является определение итогового показателя достаточности данных в рамках выполнения сценария использования «Управление материально-техническим имуществом» по формуле (6):

$$\theta_1 = 0,013.$$

Итогом поэтапного анализа значений показателей качества служит статус ТИМ-модели корпуса как «требующей корректировки и повторного контроля наполненности».

Визуализация данных

Обработку численных результатов математических моделей часто дополняют визуализацией данных с помощью таких инструментов, как Power BI, Tableau, QlikView, Google Data Studio, Plotly. Это позволяет пользователям лучше воспринимать информацию и принимать обоснованные решения на основе анализа данных.

В целях управления данными, связи различных типов сведений и визуализации результатов анализа используем отчеты Power BI. Отчет позволяет получать информацию о здании из разных источников путем связи между данными книги Excel с ЦИМ и проанализировать полученные значения с помощью визуальных экранов, а также задать диапазон допустимых значений и вывести значения не соответствующие предельно допустимым. Визуальная

проверка дает возможность облегчить и ускорить процесс управления активами корпуса.

На рис. 6 приведен отчет по заполнению атрибутов, необходимых для реализации сценария «Управление материально-техническим имуществом».

При выборе определенного сценария использования отчет в Power BI реализует фильтрацию параметров, оставляя на экране лишь соответствующие. Кроме того, он выделяет красным цветом незаполненные ячейки, что обозначает необходимость заполнения. Результат аналитического анализа, проведенного в рамках выбранного сценария, представлен в виде показателя качества:

$$\theta_1 = 0,532.$$

Отчет такого вида может помочь детально проанализировать все помещения, находящиеся в ИМ, а также проверить качество заполнения атрибутов в модели, что является преимуществом по отношению к математической модели.

Процесс визуализации и анализа данных проведен на основе ИМ учебного корпуса, базы данных с информацией о корпусе, фотофиксации помещений. В этом контексте Speckle выступает важным инструментом для визуализации данных, значительно улучшая восприятие информации.

При отправке сведений из Revit коннектор преобразует данные в формат, оптимизированный для Speckle. На высоком уровне есть все основные свойства, которые определяют помещение, такие

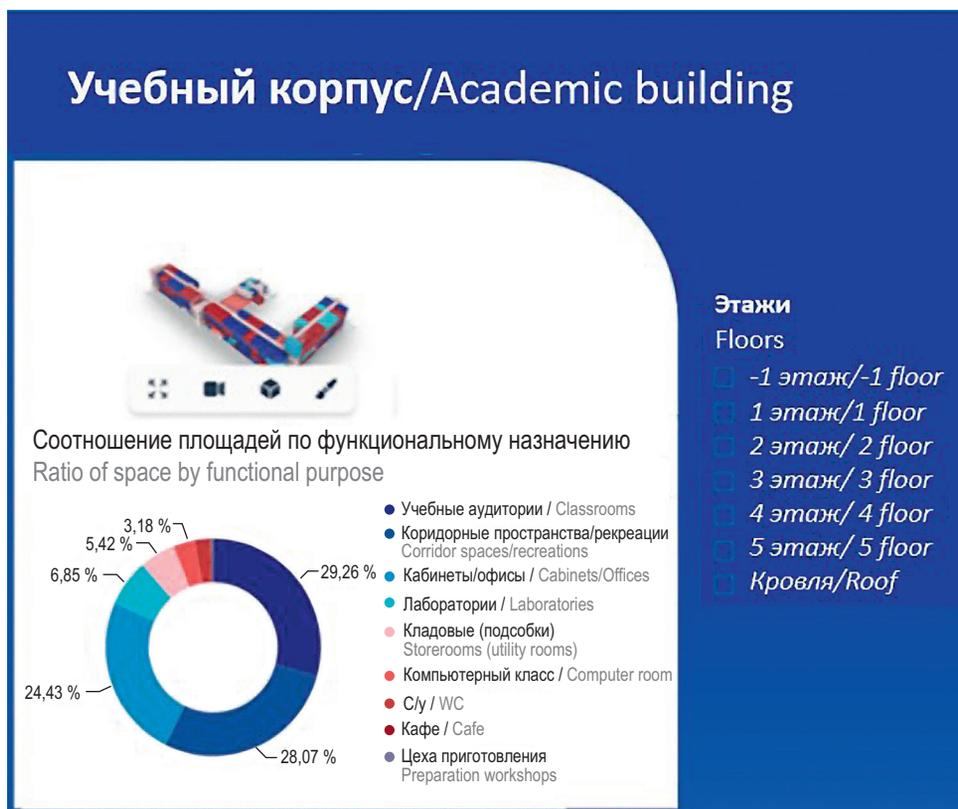


Рис. 7. Аналитический отчет о распределении площадей по различным уровням с учетом функционального и целевого назначения помещений

Fig. 7. Analytical report on the distribution of space at various levels, taking into account the functional and purpose of the premises



Рис. 8. Отчет о помещениях корпуса с выводом данных и фотофиксацией

Fig. 8. Report on the premises of the building with data output and photographic recording

как название, площадь, номер, геометрия и т.д. Все остальные параметры Revit как тип, так и экземпляр вложены в свойство «parameters».

С помощью преднастроенных шаблонов в Power BI были получены аналитические отчеты, представленные на рис. 7, 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований сформирована методика оценки возможности реализации различных сценариев использования за счет проверки наполненности атрибутов ЦИМ данными. Получен численный анализ за счет сравнения показателя качества, выполненный с помощью математической модели ($\theta_1 = 0,013$) и с помощью визуализации данных ($\theta_1 = 0,532$).

Модель учебного корпуса была классифицирована как «требующая корректировки и повторного контроля наполненности», что свидетельствует о невозможности реализации сценария использования «Управление материально-техническим имуществом» на данной модели.

Качество модели Power BI определяется его способностью считывать данные из различных ис-

точников и отслеживать корректность сведений с помощью визуальных окон. Более сложные сценарии использования, затрагивающие не только атрибутивную наполненность модели, но и физическое расположение элементов в модели не рассматривались ввиду потенциально высокой алгоритмической сложности и отсутствия типизации проверки для различных моделей.

Таким образом, для успешной реализации сложных сценариев использования ИМ необходима разработка строгих требований информационного моделирования. Этот подход гарантирует создание качественных моделей, способных эффективно поддерживать разнообразные сценарии использования и обеспечивать высокий уровень аналитической достоверности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Dahake Prof.H., Hasan Sheikh S.H.A.* BIM Data Analysis and Visualization Workflow // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 2023. Vol. 11. Issue 5. Pp. 2806–2810. DOI: 10.22214/ijraset.2023.52159
2. *Correa F.* Is BIM big enough to take advantage of big data analytics? // Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC). 2015. DOI: 10.22260/isarc2015/0019
3. *García V.V., Cos-Gayón F.L., Palmero L.I.* Optimization of facility management through the implementation of BIM in existing buildings // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2020. № 1 (37). С. 43–56. DOI: 10.15593/2409-5125/2020.01.04. EDN UVMSHE.
4. *Salzano A., Parisi C.M., Acampa G., Nicoletta M.* Existing Assets Maintenance Management: Optimizing Maintenance Procedures and Costs through BIM Tools // Automation in Construction. 2023. Vol. 149. P. 104788. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104788
5. *Топорова С.Ю.* Основные принципы организации работы и управления данными с учетом использования BIM-технологий // Студенчество России: век XXI : мат. VIII Всеросс. мол. науч.-практ. конф. 2022. С. 303–312. EDN CUSUDC.
6. *Hu Y., Li J., Han X., Yuan J.* Development Based on Unity3D Virtual Campus Roaming System // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 53. P. 03047. DOI: 10.1051/e3sconf/20185303047
7. *Su T., Li H., An Y.* A BIM and machine learning integration framework for automated property valuation // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 44. P. 102636. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102636
8. *Амелин П.Б., Амелина А.В.* Возможность использования BIM при проведении экспертизы // Неделя науки СПбПУ : мат. науч. конф. с междунар. участием. 2019. С. 175–177. EDN RVUDVR.
9. *Makisha E.* Classification of Types of Verification for Building Information Models // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2019. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934092
10. *Семенов В.А., Аришин С.В., Тарлапан О.А.* Верификация и валидация информационных моделей на основе стандарта IFC в сложных проектах // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры : мат. VI Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 187–195. DOI: 10.23968/BIMAC.2023.026. EDN ZWDYOQ.
11. *Yin M., Tang L., Webster C., Xu S., Li X., Ying H.* An ontology-aided, natural language-based approach for multi-constraint BIM model querying // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 76. P. 107066. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107066
12. *Gomes A.M., Azevedo G., Sampaio A.Z., Lite A.S.* BIM in structural project: Interoperability analyses and data management // Applied Sciences. 2023. Vol. 12. Issue 17. P. 8814. DOI: 10.3390/app12178814
13. *Сулейманова Л.А., Рябчевский И.С.* Управление данными BIM-модели при оценке устойчивости жизненного цикла зданий // Университетская наука. 2023. № 1 (15). С. 117–119. EDN XMJYMV.
14. *Yang T., Xu J., Nie X.* Analysis of Data Exchange between BIM Design Software and Performance Analysis Software Based on Revit // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2185. Issue 1. P. 012070. DOI: 10.1088/1742-6596/2185/1/012070
15. *Chen S., Zeng Y., Majdi A., Salameh A.A., Alkhalifah T., Alturise F. et al.* Potential features

of building information modelling for application of project management knowledge areas as advances modeling tools // *Advances in Engineering Software*. 2023. Vol. 176. P. 103372. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2022.103372

16. *Акри Е.П., Буранова С.Е.* Информационные системы моделирования и их применение на этапе эксплуатации зданий и сооружений // *Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии* : сб. ст. 79-й Всерос. науч.-техн. конф. 2022. С. 1156–1161. EDN EMOVDL.

17. *Каллаур Г.Ю., Мякота Д.Г., Братченко С.О., Шарипов Р.А.* Интеграция основных процессов управления строительными проектами в среде BIM // *Современные проблемы управления проектами в инвестиционно-строительной сфере и природопользовании* : мат. XI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 25-летию юбилею кафедры и 114-летию РЭУ им. Г.В. Плеханова. 2021. С. 207–213. EDN SOJKTI.

18. *Зотов А., Смирнов Д.* Популярный информационный менеджмент в строительстве (ИМС). Часть 1. Основные принципы и концепции. М., 2023.

Поступила в редакцию 15 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 8 апреля 2024 г.

Одобрена для публикации 1 марта 2025 г.

О Б АВТОРАХ : **Вероника Сергеевна Широкова** — студентка Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 7742-3677, ORCID: 0000-0003-2075-1074; shirokova.vs@edu.spbstu.ru;

Марина Вячеславовна Петроченко — кандидат технических наук, доцент, исполняющая обязанности директора Инженерно-строительного Института, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 6869-0011, Scopus: 56233437400, ORCID: 0000-0002-4865-5319; petrochenko_mv@spbstu.ru;

Егор Маркович Мелехин — аспирант, инженер Высшей школы промышленно-гражданского строительства, инженер учебной лаборатории «Механика грунтов»; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 7565-1881, ORCID: 0000-0002-6637-3059; melehin_em@spbstu.ru.

Вклад авторов:

Широкова В.С. — развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы, концепция исследования.

Петроченко М.В. — научное руководство, концепция исследования, научное редактирование текста.

Мелехин Е.М. — доработка текста, концепция исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Dahake Prof.H., Hasan Sheikh S.H.A. BIM Data Analysis and Visualization Workflow. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2023; 11(5):2806-2810. DOI: 10.22214/ijraset.2023.52159

2. Correa F. Is BIM big enough to take advantage of big data analytics? *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC)*. 2015. DOI: 10.22260/isarc2015/0019

3. García V.V., Cos-gayon F.L., Palmero L.I. Optimization of facility management through the implementation of bim in existing buildings. *PNRPU Bulletin. Urban development*. 2020; 1(37):43-56. DOI: 10.15593/2409-5125/2020.01.04. EDN UVMSHE.

4. Salzano A., Parisi C.M., Acampa G., Nicoletta M. Existing Assets Maintenance Management: Opti-

mizing Maintenance Procedures and Costs through BIM Tools. *Automation in Construction*. 2023; 149:104788. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104788

5. Toporova S.Yu. Basic principles of work organization and data management taking into account the use of BIM technologies. *Students of Russia: the XXI century : materials of the VIII All-Russian Youth Scientific and Practical Conference*. 2022; 303-312. EDN CUSUDC. (rus.).

6. Hu Y., Li J., Han X., Yuan J. Development Based on Unity3D Virtual Campus Roaming System. *E3S Web of Conferences*. 2018; 53:03047. DOI: 10.1051/e3sconf/20185303047

7. Su T., Li H., An Y. A BIM and machine learning integration framework for automated property valua-

tion. *Journal of Building Engineering*. 2021; 44:102636. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102636

8. Amelin P.B., Amelina A.V. Possibility of using BIM when conducting examination. *SPbPU Science Week : materials of a scientific conference with international participation*. 2019; 175-177. EDN RVUDVR. (rus.).

9. Makisha E. Classification of Types of Verification for Building Information Models. *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2019. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934092

10. Semenov V.A., Arishin S.V., Tarlapan O.A. Verification and validation of IFC-driven building information models in complex projects. *BIM modeling in construction and architecture problems : materials VI International Scientific and Practical Conference*. 2023; 187-195. DOI: 10.23968/BIMAC.2023.026. EDN ZWDYQO. (rus.).

11. Yin M., Tang L., Webster C., Xu S., Li X., Ying H. An ontology-aided, natural language-based approach for multi-constraint BIM model querying. *Journal of Building Engineering*. 2023; 76:107066. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107066

12. Gomes A.M., Azevedo G., Sampaio A.Z., Lite A.S. BIM in structural project: Interoperability analyses and data management. *Applied Sciences*. 2023; 12(17):8814. DOI: 10.3390/app12178814

13. Suleymanova L.A., Ryabchevskiy I.S. BIM model data management in assessing the sustainability of the life cycle of buildings. *University Science*. 2023; 1(15):117-119. EDN XMJYMV. (rus.).

14. Yang T., Xu J., Nie X. Analysis of Data Exchange between BIM Design Software and Performance Analysis Software Based on Revit. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022; 2185(1):012070. DOI: 10.1088/1742-6596/2185/1/012070

15. Chen S., Zeng Y., Majdi A., Salameh A.A., Alkhalifah T., Alturise F. et al. Potential features of building information modelling for application of project management knowledge areas as advances modeling tools. *Advances in Engineering Software*. 2023; 176:103372. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2022.103372

16. Acri E.P., Buranova S.E. Information modeling systems and their application at the stage of operation of buildings and structures. *Traditions and innovations in construction and architecture. Construction and construction technologies : collection of articles of the 79th All-Russian Scientific and Technical Conference*. 2022; 1156-1161. EDN EMOVDL. (rus.).

17. Kallaur G.Y., Myakota D.G., Bratchenko S.O., Sharipov R.A. Integration of basic management processes and building information modeling (BIM) in project management. *Modern problems of project management in the investment and construction sector and environmental management : materials XI International Scientific and Practical Conference dedicated to the 25th anniversary of the department and the 114th anniversary of REU G.V. Plekhanov*. 2021; 207-213. EDN SOJKTI. (rus.).

18. Zotov A., Smirnov D. *Popular Information Management in Construction (IMS). Part 1. Basic principles and concepts*. Moscow, 2023. (rus.).

Received March 15, 2024.

Adopted in revised form on April 8, 2024.

Approved for publication on March 1, 2025.

B I O N O T E S : **Veronica S. Shirokova** — student of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politekhnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 7742-3677, ORCID: 0000-0003-2075-1074; shirokova.vs@edu.spbstu.ru;

Marina V. Petrochenko — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Director of the Civil Engineering Institute, Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politekhnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 6869-0011, Scopus: 56233437400, ORCID: 0000-0002-4865-5319; petrochenko_mv@spbstu.ru;

Egor M. Melekhin — postgraduate student, engineer of the Higher School of Industrial and Civil Engineering, engineer of the educational laboratory “Soil Mechanics”; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politekhnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 7565-1881, ORCID: 0000-0002-6637-3059; melehin_em@spbstu.ru.

Contribution of the authors:

Veronica S. Shirokova — development of methodology, writing the original text, final conclusions, research concept.

Marina V. Petrochenko — scientific supervision, research concept, scientific editing of the text.

Egor M. Melekhin — text refinement, research concept.

The authors declare that they have no conflicts of interest.

Понятие «жизненный цикл здания»: к вопросу о концептуализации

Сергей Викторович Федосов¹, Борис Евгеньевич Нармания¹, Елена Львовна Смирнова², Виктория Сергеевна Коновалова², Наталья Сергеевна Касьяненко²

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

² *Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ); г. Иваново, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность указанной темы лежит в сфере анализа и уточнения терминологического аппарата научного исследования. Очевидно, что познание сложных технических систем предполагает их смысловое понимание и, следовательно, корректное использование терминологии, особенно заимствованной из других предметных областей. Концепция жизненного цикла (ЖЦ) есть основной вариант реализации системного подхода к сложным техническим объектам, направленный на отображение изменений состояния этих объектов в период их существования. Она связана с интеграцией процессов проектирования, производства и эксплуатации сложных технических систем в рамках единой метамоделли и предполагает выделение ряда стадий (этапов) ЖЦ и изучение взаимосвязей между ними. Понятие «жизненного цикла здания», включенное в терминологический инструментарий комплекса архитектурно-строительных наук в начале XXI в., получило официальное закрепление как в научном словаре, так и на правовом уровне. Заимствование данного понятия из других сфер знания обуславливает важность его методологического анализа.

Материалы и методы. Логико-методологический анализ понятия «жизненный цикл здания» включает исследование содержания ряда категорий (цикличность, ЖЦ), которые являются базовыми для его закрепления в научной терминологии комплекса архитектурно-строительного знания. Анализируются механизм и логика заимствования данного понятия из предметных областей других наук, обоснованность его применения в сфере строительства.

Результаты. В ходе изучения особенностей концептуализации понятия «жизненный цикл здания» выявлен ряд принципиальных отличий этого явления от других видов ЖЦ. Показана необходимость учета специфики объектов строительства, отличающихся от других сложных технических систем, и обоснована инструментальная значимость понятия «жизненный цикл здания» как теоретического конструкта.

Выводы. Содержание термина «жизненный цикл здания» основывается на интегративной концепции ЖЦ. Его включение в систему понятий комплекса архитектурно-строительных наук обосновывается необходимостью системного подхода к организации строительства объектов недвижимости с учетом использования BIM-технологии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: концепция жизненного цикла, жизненный цикл здания, техноценоз, информационная модель, открытая система, анализ состояния конструкции, оценка жизненного цикла

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Федосов С.В., Нармания Б.Е., Смирнова Е.Л., Коновалова В.С., Касьяненко Н.С. Понятие «жизненный цикл здания»: к вопросу о концептуализации // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 4. С. 584–595. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.584-595

Автор, ответственный за переписку: Виктория Сергеевна Коновалова, kotprotiv@yandex.ru.

The concept of “building life cycle”: the issue of conceptualization

Sergey V. Fedosov¹, Boris E. Narmaniya¹, Elena L. Smirnova²,
Viktoriya S. Konovalova², Nataliya S. Kasiyanenko²

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

² *Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU); Ivanovo, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The relevance of this topic lies in the field of analysis and clarification of the terminological apparatus of scientific research. It is obvious that the knowledge of complex technical systems implies their semantic understanding and, consequently, the correct use of terminology, especially borrowed from other subject areas. The concept of the life cycle is the main variant of the implementation of a systematic approach to complex technical objects. It is aimed at displaying

changes in the state of these objects during their existence. It is associated with the integration of the processes of design, production and operation of complex technical systems within a single meta-model and involves the identification of a number of stages of the life cycle and the study of the relationships between them. The concept of the “building life cycle”, included in the terminological toolkit of the complex of architectural and construction sciences at the beginning of the XXI century, has been officially consolidated both in the scientific dictionary and at the legal level. The borrowing of this concept from other fields of knowledge determines the importance of its methodological analysis.

Materials and methods. The logical and methodological analysis of the concept of “building life cycle” includes the study of the content of a number of categories (cyclical nature, life cycle), which are basic for its consolidation in the scientific terminology of the complex of architectural and construction knowledge. The mechanism and logic of borrowing this concept from the subject areas of other sciences, the validity of its application in the field of construction are analyzed.

Results. During the study of the features of the conceptualization of the concept of “building life cycle”, a number of fundamental differences between this phenomenon and other types of life cycles were revealed. The necessity of taking into account the specifics of construction projects that differ from other complex technical systems was shown, and the instrumental significance of the concept of “building life cycle” as a theoretical construct was substantiated.

Conclusions. The content of the term “building life cycle” is based on the integrative concept of the life cycle. Its inclusion in the system of concepts of the complex of architectural and construction sciences is justified by the need for a systematic approach to the organization of real estate construction, taking into account the use of BIM-technology.

KEYWORDS: life cycle concept, building life cycle, technocenosis, information model, open system, structural condition analysis, life cycle assessment

FOR CITATION: Fedosov S.V., Narmaniya B.E., Smirnova E.L., Konovalova V.S., Kasiyanenko N.S. The concept of “building life cycle”: the issue of conceptualization. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(4):584-595. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.584-595 (rus.).

Corresponding author: Viktoriya S. Konovalova, kotprotiv@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе формирования языка науки важная методологическая роль отводится процедуре концептуализации понятий. Суть ее заключается в том, что происходит введение определенных понятийных конструктов в массив эмпирических данных. Тем самым обеспечивается теоретическая организация знания на основе выстраивания системы понятий, что позволяет в дальнейшем разрабатывать гипотезы о природе и характере взаимосвязей значимых объектов.

Четкая разработанность научного терминологического аппарата во многом определяет его инструментальную точность и надежность обмена информацией в профессиональном сообществе. В сфере естествознания и технического знания требования к терминологии достаточно жесткие: ее отличают строгость, определенность, однозначность. Вместе с тем в процессе концептуализации неизбежно происходит диффузия из одной предметной области научного знания в другую. Нередко в профессиональный оборот вводятся понятия из повседневного языка путем метафорического переноса значения. Как следствие, имеет место размывание границ понятия.

Когда говорим о жизненном цикле (ЖЦ) или цикле жизни, мы обычно имеем в виду продолжительность существования и полезность вещей или в случае живого организма жизнеспособность. Этот этап состоит из различных стадий, периодов или транзитов. Он обычно начинается с создания или рождения и достигает кульминации в смерти, устаревании или бесполезности. С этой точки зрения абсолютно все имеет свой собственный ЖЦ. Таким образом, данный термин может использоваться в самых разных областях жизни, от биологии (где его называ-

ют биологическим циклом), разделяя в этом случае по типу живого существа, до маркетинга и сфер производства.

Говоря о ЖЦ продукта, имеют в виду траекторию, описывающую количество продаж продукта с момента его выхода на рынок для потребления. Другими словами, речь идет об эволюции продаж продукции с течением времени. Этот ЖЦ отличается для каждого типа продукта. В административном мире проекты также проходят определенный ЖЦ с набором стадий или фаз, которые отмечают их естественную эволюцию по мере того, как они обретают форму и становятся реальностью. Этот цикл всегда можно прервать заранее, в случае если проект будет заброшен, но, если все пойдет хорошо, он приведет к достижению общих целей, ради которых изначально и был задуман.

Жизненный цикл имеется и у отраслей промышленности и индустрии. Он также начинается с выхода на рынок, затем наступает стадия роста и зрелости. Если отрасли не справляются с меняющимися потребностями потребителей, они закрываются или трансформируются в другие. Но их ЖЦ намного длиннее жизненного цикла продукта.

Актуальность экологической проблематики, вопросов энергоэффективности зданий и сооружений, устойчивого строительства обусловила включение в терминологический аппарат архитектурно-строительных наук понятия «жизненный цикл зданий» (ЖЦЗ). Концепция жизненных циклов — одна из составляющих современной методологии управления различными процессами, в том числе и строительными проектами. В основе экоустойчивого подхода в строительстве лежит оценка ЖЦЗ от начала проектирования и создания эксплуатационной системы до ввода в эксплуатацию.

Хотя термин «жизненный цикл здания» впервые появился в зарубежных исследованиях в начале 80-х гг. прошлого века [1, 2], в полной мере в то время он не рассматривался как потенциальный стимул нового экологического подхода к проектированию зданий. В России этот термин был официально введен в техническом регламенте о безопасности зданий и сооружений в 2009 г. (Федеральный закон № 384-ФЗ¹, ст. 2). С тех пор можно констатировать рост интереса представителей профессионального научного сообщества к содержанию этого понятия, выявлению соотношения его содержания с реальным процессом строительства зданий и сооружений. Не ограничиваясь отсылкой к определению ЖЦЗ в указанном правовом документе, авторы работ [3–7] уделяют значительное внимание методологии включения концепта «жизненный цикл зданий» в комплекс вопросов, связанных с развитием BIM-моделирования в современном строительстве.

Важной теоретической предпосылкой введения понятия «жизненный цикл зданий» в терминологический аппарат инженерно-строительного и архитектурного научного знания является осмысление универсальных свойств цикличности как основы развития и стабильности многообразных природных и социальных процессов [8–10]. Поскольку архитектурная и строительная индустрия все больше уделяет внимания экологичности, разрабатываются более комплексные методы оценки и снижения воздействия зданий на окружающую среду. Оценка ЖЦЗ становится одним из наиболее функциональных инструментов оценки.

Универсальность цикличности процессов, протекающих в природе (неживой, живой) и социальном пространстве, проектной и управленческой деятельности, на определенном этапе начинает проявляться и в сфере технической реальности. Разработанная Б.И. Кудриным в 70–80-е гг. XX в. концепция техноценоза [11–13] вызывает отклик у современных авторов. Все более востребованным становится обращение к проблеме синтеза технической и социальной реальности, к практическим вопросам управления их взаимодействием.

Жизненный цикл и процесс комплексного проектирования можно понимать как процесс, в котором его взаимосвязь с окружающим контекстом, технические компоненты и технологии являются частями единой системы на протяжении всего ЖЦЗ. Эта цель может быть достигнута, если члены междисциплинарной профессиональной команды будут работать сообща с самого начала, с момента концептуального проектирования, принимая стратегические решения и решая все вопросы проектирования. Таким образом, энергоэффективные технологии и стратегии могут быть включены в проект здания

таким образом, чтобы это соответствовало соображениям ЖЦ. В отличие от обычного линейного процесса проектирования, процесс комплексного проектирования характеризуется серией повторяющихся циклов действий на каждом этапе проектирования: от концепции до схемы и детального проектирования и документации для строительства. В каждом цикле деятельности участвуют все соответствующие члены команды, которые активно взаимодействуют друг с другом для выработки оптимальных решений. Создание многопрофильной команды в начале проекта имеет решающее значение. В контексте устойчивых зданий ЖЦ и процесс комплексного проектирования постепенно перешли от экспериментальных и специальных применений к общепринятой практике в работе консультантов и застройщиков.

Подход к проектированию ЖЦ, в отличие от большинства исследований в области эффективности жизненного цикла, помимо учета воздействия на окружающую среду, включает также экономический и функциональный анализ эффективности. Таким образом, он позволяет получить комплексное представление о преимуществах и недостатках, выбирая различные варианты проектирования с учетом нескольких аспектов анализа.

Цель статьи состоит в том, чтобы проанализировать процесс формирования научного понятия «жизненный цикл здания», осуществленный путем заимствования из других предметных областей, и показать его инструментальную значимость именно в комплексе архитектурно-строительных наук.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для изучения процесса концептуализации понятия «жизненный цикл здания» стали научные публикации, в которых отражены различные подходы к пониманию ЖЦЗ. Накоплен достаточно богатый теоретический и практический опыт выявления и осмысления содержания, вкладываемого в термин «жизненный цикл здания». При раскрытии содержания научного понятия большую роль играет его определение. В связи с этим анализировались различные дефиниции ЖЦЗ с тем, чтобы эксплицировать внутреннее содержание понятия через выявление его основных характеристик.

Логический анализ был дополнен историческим, с помощью которого прослеживалась цепочка переходов понятия «жизненный цикл» из одной области научного знания в другую вплоть до сферы строительства. При этом акцентировалось внимание на выявлении общих оснований, позволяющих осуществить такой перенос без утраты смыслового значения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Интересно отметить, что при большой распространенности понятия «цикл» в разных науках практически невозможно встретить его определе-

¹ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ.

ние. Как правило, включая этот термин в исследовательский инструментарий, авторы исходят из того, что его значение известно и не требует отдельного пояснения. Возможно, это отчасти объясняется тем, что цикличность — это фундаментальное свойство сложных систем (в живой и неживой природе), воспринимаемое людьми как естественное явление. В нем выражена не прерывающаяся взаимосвязь и взаимодействие всего со всем посредством повторяющихся колебаний, подъемов и спадов.

Исчисление следующих друг за другом циклических актов порождает понятие «время», а исчисление объектов, возникших друг за другом в результате циклических актов, — понятие «пространство». Генетическая связь этих понятий фиксируется давно. Ее суть заключается в том, что в основе обоих — исчисление циклов. В цикле одно событие предшествует другому, и этот порядок постоянно воспроизводится. В нашем мире он называется причинно-следственными отношениями. В цикле предшествующее событие называется причиной, а последующее — следствием [14].

Циклические явления широко распространены в природе (например, циклы в термодинамике, суточные преобразования в биоценозах, циклы изменения численности и расселения животных и растений и пр.). Таким образом, всеобщая закономерность природы заключается в цикличности развития, в том, что оно идет не по восходящей линии, а циклами. Разнообразные циклы проявляются и в обществе. Их бытие укоренено в объективных законах развития и функционирования социальной реальности.

Отдельного внимания заслуживают циклы, связанные с деятельностью человека (процессы управления и проектирования). Разработка современных основ теории деятельности, нашедшей применение в области проектирования технических систем, была осуществлена в трудах отечественного философа Г.П. Щедровицкого и представителей его школы [15]. Ему принадлежит мысль о том, что деятельность следует рассматривать как систему с неоднородной полиструктурой за счет многочисленных и весьма разнообразных компонент и связей [15].

В целом к общим атрибутивным признакам цикла относятся последовательность, повторяемость, а также упорядоченность и устойчивость. Сравнение определений «жизненного цикла», применяемых в разных областях научного знания, показывает, что к его ключевым характеристикам обычно относятся длительность, стадийность, закономерный характер (повторяемость, устойчивость) воспроизведения одних и тех же частей процесса развития.

Понятие «жизненный цикл» часто используется для обозначения темпоральности в общем смысле; при таком использовании термины «жизненный цикл», «продолжительность жизни» и «жизнен-

ный путь» часто рассматриваются как идентичные. Чаще всего эта концепция применяется метафорически или эвристически, чтобы инициировать анализ явлений развития или созревания в различных социальных областях — от отдельных людей до организаций. Разнообразие значений и способов использования указывает на широкую привлекательность этой концепции в качестве основы для изучения развития.

Итак, термин «жизненный цикл» проделал интересную «эволюцию», переходя из одной предметной области в другую. Изначально заимствованный из биологии, в XX в. он стал активно использоваться в экономическом знании (ЖЦ товара (продукции), ЖЦ изделия, ЖЦ инновации и др.). Впоследствии из экономических исследований был перенесен в сферу функционирования искусственных систем (область машиностроения). В конце XX – начале XXI в. возникла концепция инженерии ЖЦ, которая предполагает широкое использование информационных и коммуникационных технологий в моделировании и интеграции его этапов.

Понятие «жизненный цикл» в инженерных дисциплинах, связанных с созданием сложных технических объектов, по-видимому, объясняется тем, что любой сложный инженерно-технический объект претерпевает большие изменения от момента возникновения замысла до прекращения функционирования, подобно циклу живого организма — от зарождения до смерти. Так, концепция ЖЦ стала объединяющей для естественно-научного, социального знания и комплекса технических наук. Вместе с тем перенос термина из одной научной сферы в другую путем метафоризации требует его «адаптации» в другом предметном поле. Именно поэтому многие авторы уделяют особое внимание трактовке термина «жизненный цикл» применительно к таким сложным техническим объектам, как здания. Тесная связь цикличности с показателями длительности как отдельных этапов, так и цикла в целом выявляет ее вовлеченность в процессы, которые в широком смысле слова можно понимать как жизнь системы.

Проектирование ЖЦ можно рассматривать как инженерную деятельность, которая включает: применение технологических и научных принципов при проектировании и изготовлении продукции с целью защиты окружающей среды и экономии ресурсов, стимулирования экономического прогресса, учета необходимости устойчивого развития и в то же время оптимизации производственного цикла и минимизации загрязнения окружающей среды и отходов.

Оценка жизненного цикла (LCA) возникла в начале 1970-х гг. Основой стали проблемы управления энергией и отходами. В 1970-х и 1980-х гг. проведено множество исследований с использованием различных методов и без общей теоретической основы. Последствия были довольно негативными, поскольку оценка ЖЦ изделий напрямую приме-

нялась на практике фирмами для обоснования рыночных требований. Полученные результаты сильно различались, хотя объекты исследования часто были одинаковыми, что не позволяло этому подходу стать общепринятым и прикладным аналитическим инструментом.

С середины 1980-х гг. появилась концепция ЖЦ продукта, фокусирующаяся не только на сроке службы продукта на рынке; вместо этого она рассматривает реальный и полный срок службы отдельного продукта — от разработки его концепции, проектирования, производства, продажи, использования потребителями и обслуживания до вывода из эксплуатации. Появилась модель, которая продолжает использовать во многом ту же терминологию, что и первоначально, она была представлена в рамках ЖЦ продукта, хотя и по-своему, и является прямым результатом постоянного интереса к биологически обоснованной идеологии «жизни» рассматриваемого продукта. Что изменилось, так это направленность модели и ее применение.

Помимо этой «первоначальной» концепции ЖЦ продукта в маркетинге, за последние 25 лет или около того появилось несколько ответвлений от оригинальных исследований, которые позволили концепции измениться по сравнению с ее первоначальным представлением в маркетинговой литературе и оказаться в центре внимания других исследователей. Первоначальная концепция ЖЦ продукта, хотя и ориентированная в первую очередь на маркетинговые потребности и концепции, часто распространяющиеся на регионы, которые находятся за пределами современной маркетинговой сферы, что объясняет их привлекательность для исследователей, не занимающихся маркетингом.

Здания как сложные технические объекты обладают своей спецификой. Во-первых, существует привязка объекта недвижимости к конкретному земельному участку (пятну застройки). Это делает его уникальным в том смысле, что качество здания определяется максимальным соответствием нетиповой проектной документации, а проектной документации, адаптированной к конкретной географической точке [16]. Во-вторых, здания максимально интегрированы в окружающую среду, являясь частью био- и техноценоза. Кроме того, ЖЦЗ характеризуется длительностью, как правило, большей, чем у других сложных технических объектов, и стадийностью. Согласно п. 5 ст. 2 Федерального закона № 384-ФЗ, жизненный цикл здания — это период, в течение которого осуществляются инженерные изыскания, проектирование, строительство (в том числе консервация), эксплуатация (в том числе текущие ремонты), реконструкция, капитальный ремонт, снос здания или сооружения». Однако, как отмечают И.С. Грибкова и М.В. Екутеч, вопреки «классической» логике «процессы проектирования, строительства и эксплуатации очень часто способ-

ны идти почти одновременно» [17]. Общепринятая цепочка стадий ЖЦЗ (проектирование – строительство – эксплуатация – снос), используемая для упрощенного понимания работы со зданием, на самом деле не представляет собой цикл в его классической трактовке, а просто указывает на временной период существования здания. Такой подход достаточно распространен в строительстве зданий и сооружений в отличие от машиностроения, где понятие «жизненный цикл» рассматривается как синоним понятия «система».

Термин «жизненный цикл здания» в широком смысле охватывает процесс планирования и разработки дизайна и ЖЦЗ, начиная с концепции и заканчивая сроком службы здания и его размещением.

В то же время системный подход становится все более распространенным в сфере строительства, и в соответствии с ним ЖЦЗ понимается как сложная система взаимосвязанных процессов [18], «обычно обладающих параллельными, итеративными, рекурсивными и зависящими от времени характеристиками: в течение жизненного цикла здания взаимодействуют с внешней средой, через них проходят материальные, людские, финансовые, информационные и другие потоки, являющиеся подсистемами»². Жизненный цикл здания, таким образом, представлен как: 1) целое, объединяющее отдельные процессы; 2) открытая динамичная система, интегрированная в окружающее пространство; 3) взаимосвязь подсистем.

Определяя понятие «жизненный цикл здания», другие авторы [19, 20] указывают на то, что его можно рассматривать как «совокупность связанных причинно-следственными отношениями этапов, стадий, процессов, образующих законченный виток развития от возникновения проектного замысла до ликвидации». Но относительно повторяемости витков ЖЦЗ от проектного замысла до ликвидации возникает вопрос: что именно является основой циклической смены состояний здания? Пройдя все этапы своего функционирования, даже если в их цепочку включить редевелопмент, объект недвижимости перестает существовать, и новый виток уже не повторяется.

По мнению К.Ю. Лосева [16, 21], цикличность процессов в строительстве связана с наличием определенного носителя информации (как, например, ДНК в биоценозах), а именно — информационной модели (ИМ) здания. Жизненный цикл здания определяется им как «повторяющаяся серия состояний информационных моделей в процессе их жизненного пути (от создания модели до прекращения использования), где цикличность возникает через извлечение из моделей знаний и специфического опыта в среду общих данных с использованием последних

² ГОСТ Р 57193–2016. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем.

в новых информационных моделях аналогичных категорий зданий» [16]. Соответственно, применительно к отдельному зданию более корректно говорить о «жизненном пути», а термин «жизненный цикл» возможен только по отношению к категориям зданий (категоризация по классам капитальности, функциональному назначению, типу строительной системы, влиянию на окружающую среду после проведения анализа ЖЦЗ) [21]. В 70–80-е гг. XX в. похожая мысль была высказана автором концепции техноценозов Б.И. Кудриным, полагавшим, что в изделиях генетическая информация существует в виде конструкторско-технологической документации [11, 22].

Разграничение понятий «жизненный путь здания» и «жизненный цикл здания» фундаментально обосновано различием, которое существует между временным интервалом жизни (life path, life course) отдельного индивида, организации, сложной технической системы и ЖЦ (life cycle) как цепочки повторяющихся стадий развития на уровне ценоза (сообщества) в целом. В этой связи стоит обратить внимание на некоторые смысловые пересечения технических (например, с точки зрения достижения энергоэффективности зданий) и социологических аспектов изучения ЖЦЗ методом жилищных биографий. Так, например, сотрудники ETH Zurich (Швейцарская высшая техническая школа Цюриха) стремились «проследить во времени различные характеристики, которые вносят свой вклад в долговечность, качество, оценку и длительное функционирование дома», «раскрыть взаимодействия построенного пространства, социальной жизни и деятельности», составляли «портреты домов», в которых объединены архитектурный, исторический и этнографический аспекты анализа [23].

Системы ЖЦ присущи структуре оценки устойчивости зданий, и теория жизненного цикла нуждается в пересмотре или дополнительном определении, чтобы структурировать концептуальное мышление. Переосмысление концепции ЖЦЗ было важным, поскольку оно выявило значимые сферы принятия решений заинтересованными сторонами в области охраны окружающей среды, которые могут быть определены как нуждающиеся в эффективной поддержке на пути к достижению своих целей в области устойчивого развития. Прорыв в мышлении о стратегиях внедрения экологических норм в процесс проектирования зданий позволил выделить временные этапы проектирования как отдельные от физического ЖЦЗ. Предполагалось, что, если бы можно было отличить временную деятельность от физической, это обеспечило бы некоторую свободу в применении информации к различным временным приложениям. При таком подходе физический ЖЦЗ отличается от действий в течение временного ЖЦ в процессах проектирования и планирования управления активами, которые необходимы для его строительства.

В случае с большими и сложными зданиями существуют своего рода стандартизированные процедурные модели отдельных этапов всего процесса строительства, которые хранятся в головах профессионально подготовленных старших инженеров-проектировщиков и менеджеров и постоянно совершенствуются ими благодаря опыту работы над проектами. Эти разрозненные процедурные модели и информационные системы не могут быть прочитаны, изучены и усовершенствованы исследовательскими группами. Отдельные элементы объединяются и координируются уникальным образом для каждого строительного проекта посредством непрерывного процесса совещаний по координации. Отдельные этапы всего процесса меняются при смене сотрудников в проектной команде.

Жизненный цикл и комплексное проектирование косвенно способствуют социальной и экологической устойчивости, предоставляя методологии и вычислительные инструменты для создания высокоэффективных зданий. Оценка ЖЦ и принятие решений на основе жизненного цикла также позволяют решить проблему нехватки природных ресурсов, эффективно использовать строительные материалы и компоненты, а также учитывать вопросы, связанные с окончанием срока службы.

Подход, основанный на ЖЦ, также способствует экономическому развитию за счет разграничения реальной экономии средств от экономии на первоначальных затратах на строительство, которая в конечном итоге может привести к ухудшению экологических показателей здания и увеличению расходов во время эксплуатации здания. Конечным результатом является снижение общих затрат на ЖЦ, а также социальных и экологических издержек, связанных со строительством и эксплуатацией зданий.

Жизненный цикл и комплексное проектирование косвенно способствуют социальному развитию в целом, предоставляя заинтересованным сторонам методологии для строительства зданий высокого качества. Этот процесс укрепляет отношения между профессионалами, связанными со строительством, способствуя командной работе и позитивному взаимодействию, что приводит к лучшему чувству экологической и социальной ответственности. Этот процесс также обеспечивает платформу для взаимного обучения, обмена знаниями и инноваций/творчества в создании устойчивой застроенной среды.

Однако оценка ЖЦЗ только сейчас находит применение в инструментальных приложениях. Основные инструменты анализа были основаны на теории ЖЦ, исторически разработанной в секторах тяжелой промышленности, и учитывают интересы потребителей на более экологичном рынке. Впоследствии при разработке инструментов оценки ЖЦЗ были исключены представления о первичном секторе промышленности — шахтах, заводах, потребительских товарах и транспорте, а стали учи-

тываться технологии для управления активами, объектами, проектированием зданий, строительством и эксплуатационными процессами.

Анализ ЖЦ строительного объекта направлен на оценку опасностей, связанных со строительным объектом в отдельных областях, на этапах или фазах цикла или деятельности как путем выявления, так и количественной и качественной оценки используемых материалов и энергии, а также отходов, попадающих в окружающую среду, и оценки воздействия этих материалов, энергии и отходов для окружающей среды. Метод оценки ЖЦ направлен на изучение воздействия строительного объекта на окружающую среду в области экосистемы, здоровья человека, используемых ресурсов или безопасности в широком понимании. Оценка воздействия может быть выполнена как для продукта, так и для функции. Оценка ЖЦ рассматривается как «анализ от начала до конца». В оценку ЖЦ входят другие методы, например, оценка стоимости ЖЦ или его социальная оценка, поэтому она является отличным инструментом для анализа ЖЦЗ. Что касается функционального аспекта анализа, то альтернативные материалы-кандидаты сравниваются с учетом их внутренних характеристик, эксплуатационных характеристик и корреляции с наиболее важными конструктивными особенностями продукта. Решить, что включить в курс оценки ЖЦ может быть непросто из-за множества методик и очевидных различий во взглядах на предмет.

Существует два концептуально различных подхода к оценке ЖЦ: оценка, основанная на процессах, и основанная на экономическом анализе затрат и выпуска. Основное различие между этими двумя подходами заключается в том, что в то время, как первый фокусируется на отдельных этапах производства продукта или оказания услуги, второй использует макроэкономическую структуру, которая включает в себя все денежные потоки, генерируемые в экономике страны в результате производства продукта или предложения услуги.

Оценка ЖЦ на основе процессов проводится в 4 этапа: цель, определение, масштаб и границы процесса, которые необходимо проанализировать; расчет информации о входных и выходных данных с помощью инвентаризационного анализа; оценка воздействия; интерпретация результатов. При анализе на основе процессов сведения для этапа инвентаризации берутся из баз данных компаний, правительственных и неправительственных организаций. Информация для оценки воздействия собирается из литературы и общедоступных баз данных.

Экономическая оценка ЖЦ на основе соотношения затрат и выпуска использует экономические таблицы «затраты – выпуск» в сочетании со сведениями о потреблении ресурсов, выбросах в окружающую среду и отходах, чтобы отслеживать различные экономические операции, потребности

в ресурсах и выбросы в окружающую среду, необходимые для конкретного продукта или услуги. Указанный подход позволяет фиксировать все применяемые ресурсы и выбросы, вызванные прямо или косвенно (в цепочке поставок) производством продукта или предложением услуги.

Эти два метода оценки ЖЦ имеют свои преимущества и недостатки. Оценка на основе процессов позволяет проводить детальный анализ конкретного процесса в определенный момент времени и пространства. Однако она часто характеризуется субъективизмом в определении процессов, которые следует учитывать, главным образом в отношении границ и источников данных, которые стоит применять. Кроме того, местные условия и специфика времени, необходимого для проведения инвентаризации, могут отличаться от условий, выявленных при других оценках. Оценка на основе процесса требует большого объема данных, и отсутствие доступных сведений может ограничить точность исследования. С другой стороны, экономическая оценка ЖЦ на основе соотношения затрат и выпуска дает возможность избежать большинства субъективных проблем, которые влияют на процесс. Этот подход страдает от недостаточной репрезентативности используемого процесса из-за чрезмерной агрегации данных, поскольку он дает среднюю оценку для большинства производственных процессов.

Чтобы воспользоваться преимуществами обоих подходов, разработана гибридная оценка ЖЦ, которая применяет комплексность экономической оценки в отношении выбросов в цепочке поставок, чтобы преодолеть необходимость выполнения оценки всех процессов в цепочке поставок на основе процессов, а также использовать оценку на основе процессов для устранения недостатка точности экономической оценки, если она является слишком общей для целей подробного анализа ЖЦ.

Концепция ЖЦ становится операциональной посредством управления жизненным циклом. Этот подход к управлению реализует инструменты и методологии в корзине мышления ЖЦ. Данная система управления продукцией помогает предприятиям минимизировать экологическую и социальную нагрузку, связанную с их продукцией или продуктовым портфелем в течение всего ЖЦ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Концепция ЖЦ заключается в выходе за рамки традиционного внимания к производственной площадке и производственным процессам и включении в нее экологических, социальных и экономических воздействий продукта на протяжении всего его ЖЦ.

Таким образом, определяющим фактором любого ЖЦ является процесс развития, охватывающий неживую и живую природу, социальные процессы, область управления и инженерного проектирования, техни-

ческих систем. Цикличность обуславливает устойчивость системы на разных уровнях ее существования.

Концепция ЖЦ может рассматриваться как основа междисциплинарной интеграции научного знания, позволяет выявить базовые содержательные характеристики процессов развития, осмысливать природу сложных технических систем и их взаимосвязи с человеком.

Включение концепта «жизненный цикл здания» в понятийный аппарат комплекса строительных и архитектурных наук отражает практическую потребность в разработке и внедрении системного подхода к организации строительства объектов недвижимости. В рамках такого подхода здание не является статичным, изменяясь в условиях взаимодействия с другими элементами био- и техноценоза. Оно само представляет некое подобие живого организма, открытой системы, обменивающейся ресурсами с внешней средой. Следовательно, ЖЦЗ нельзя рассматривать по аналогии, например, с ЖЦ изделий машиностроительной отрасли (станки, самолеты, корабли).

Осмысление содержания понятия «жизненный цикл здания» связано с поиском концептуальных конструкций, позволяющих адекватно описать его особенности применительно к сфере проектирования и строительства. Отталкиваясь от общепринятого определения ЖЦЗ как протекающей во времени последовательности определенных стадий, исследователи не ограничиваются им. Большая временная продолжительность и специфика реализации стадий ЖЦ в совокупности с уникальностью каждого конкретного объекта капитального строительства и его привязки к определенному географическому участку требуют системного подхода к пониманию ЖЦЗ.

Дискуссионным является вопрос о необходимости разграничения понятий «жизненный путь здания» и «жизненный цикл здания». Жизненный путь здания фиксирует временную продолжительность его существования от стадии проектирования до стадии сноса, а ЖЦЗ связывается с серией состояний информационных моделей в процессе их жизненного пути. При этом цикличность возникает в результате периодического извлечения из ИМ знаний и опыта в среду общих данных.

Представляется, что два подхода к пониманию сущности ЖЦЗ не столько противоречат друг другу, сколько взаимодополняют. Один исходит из объективности ЖЦЗ как периодического воспроизведения системы процессов, структурированных на этапы, стадии в соответствии с логикой человеческой деятельности при решении определенных профессиональных задач в архитектурно-строительной сфере. Другой — из его информационной природы как серии повторяющихся ИМ, обеспечивающих обмен информацией всех вовлеченных в этот процесс профессионалов через среду общих данных.

Философская основа для разработки теоретической базы основана на рассмотрении интегрированных и циклических внутренних, наружных и встроенных экологических систем как экологических комплексов. Мышление о ЖЦ привело к более объективному стратегическому планированию, когда оно используется для поддержки принятия решений, поскольку позволяет достичь более всеобъемлющих результатов, когда экономическая и экологическая оценка рассматриваются параллельно, а не затемняются субъективной оценкой.

В целом эвристическая ценность концепции ЖЦЗ заключается в том, что она позволяет рассматривать осуществление процесса градостроительства с точки зрения формирования города как техноценоза и последующего оптимального управления им. Долгосрочная цель состоит в том, чтобы перестроить процессы разработки и эксплуатации зданий, а также разрозненную организационную структуру команды, работающей над проектом здания, чтобы наилучшим образом использовать новые и постоянно меняющиеся вспомогательные технологии в области автоматизации и телекоммуникаций.

Для достоверного анализа, основанного на ЖЦ, необходимо учитывать три фундаментальных аспекта: функциональные и/или технические характеристики, экономические показатели (стоимость) и экологические показатели. Эти аспекты должны присутствовать в процессах принятия решений, связанных: 1) с разработкой конкурентоспособного продукта и процессом производства планирования или разработки систем; 2) оценкой и выбором устойчивых технологий/материалов.

Разработка все более сложных продуктов (систем или оборудования) в более короткие сроки может быть наиболее эффективной благодаря целостному пониманию ЖЦ продуктов и процессов. Кроме того, изменение всей концепции промышленного производства и поведения общества потребления обусловлено глубокими демографическими и экономическими изменениями, а также растущим осознанием экологических проблем. Чтобы поддержать философию разработки ЖЦ на ранних этапах проектирования, разработаны рекомендации по внедрению, рассматривающие формирование ЖЦ как непрерывный процесс разработки спецификации, отвечающие набору требований и целей, охватывающих ЖЦ продукта. Кроме того, разработка ЖЦ должна быть интегрирована в существующие корпоративные структуры и основываться на уже сформированных командах разработчиков, а не на новых командах.

В рамках проекта здания исследуются как производственные единицы с использованием методов промышленной инженерии при определении идеальных организационных структур, процессов разработки и управленческих функций, необходимых для эффективного производства этих единиц. При

этом процесс ЖЦЗ рассматривается как комплексная макронаука.

Мышление ЖЦ предоставило концептуальную основу для продвижения повестки дня устойчивого развития в государственном и частном секторе для содействия принятию решений на всех уровнях относительно политики и разработки продукта, производства, закупок и окончательной утилизации.

Подходы ЖЦ могут использоваться во всех секторах и изучать ключевые категории и показатели влияния, оценивая экологические и социальные воздействия (например, экологическую и социальную оценку ЖЦ, углеродный след, водный след и т.д.), а также конечные эффекты этих воздействий на все три ключевых столпа устойчивости (например, оценку устойчивости ЖЦ).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Bekker P.C.F.* A life-cycle approach in building // *Building and Environment*. 1982. Vol. 17. Issue 1. Pp. 55–61. DOI: 10.1016/0360-1323(82)90009-9

2. *Gustafsson S.-I., Karlsson B.G.* Why is life-cycle costing important when retrofitting buildings // *International Journal of Energy Research*. 1988. Vol. 12. Issue 2. Pp. 233–242. DOI: 10.1002/er.4440120206

3. *Таланов В.В.* О некоторых принципах, лежащих в основе BIM // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2016. № 4 (688). С. 108–114. EDN WEASCN.

4. *Лосев Ю.Г., Лосев К.Ю.* Особенности информационного моделирования объектно-ориентированных автоматизированных технологий в строительстве // *Строительство и архитектура*. 2023. Т. 11. № 1. С. 16. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-11-1-16-16. EDN DHSMPC.

5. *Савин М.А., Белаиш В.В.* Применение BIM для управления жизненным циклом зданий и сооружений // *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2023. Т. 2. № 2. С. 42–50. DOI: 10.23947/2949-1835-2023-2-2-42-50. EDN XJRJAJ.

6. *Yang A., Han M., Zeng Q., Sun Y.* Adopting Building Information Modeling (BIM) for the Development of Smart Buildings : a Review of Enabling Applications and Challenges // *Advances in Civil Engineering*. 2021. Vol. 2021. Issue 1. DOI: 10.1155/2021/8811476

7. *Razali M.F., Haron N.A., Hassim S., Alias A.H., Harun A.N., Abubakar A.S.* A Review: Application of Building Information Modelling (BIM) over Building Life Cycles // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 357. Issue 1. P. 012028. DOI: 10.1088/1755-1315/357/1/012028

8. *Василькова В.В.* Порядок и хаос в развитии социальных систем: Синергетика и теория социальной самоорганизации. СПб. : Лань, 1999. 478 с.

9. *Delisle R.G.* Cyclicity, Evolutionary Equilibrium, and Biological Progress // *Evolutionary Biology — New Perspectives on Its Development*. 2019. Pp. 197–228. DOI: 10.1007/978-3-030-17203-9_7

10. *Sizova O., Libin I., Perez-Peraza J.* Cycles in economical and biological processes and possible

influence of off-site factors on them // *European Journal of Natural History*. 2012. Issue 6. Pp. 37–40.

11. *Кудрин Б.И.* Исследования технических систем как сообществ изделий — техноценозов // *Системные исследования. Методологические проблемы*. Ежегодник. М. : Наука, 1981. С. 236–254.

12. *Кудрин Б.И.* Научно-технический прогресс и формирование техноценозов // *ЭКО: Экономика и организация промышленного производства*. 1980. № 8. С. 15–28.

13. *Кудрин Б.И.* Применение понятий биологии для описания и прогнозирования больших систем, формирующихся технологически // *Электрификация металлургических предприятий Сибири*. 1976. № 3. С. 171–204.

14. *Ловецкий Г.И., Александров М.А.* Ритм как физическое явление и философский принцип: развитие идей А.Л. Чижевского // *Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики*. 2016. № 7 (69). С. 102–108.

15. *Щедровицкий Г.П.* Избранные труды. М. : Школа культурной политики, 1995. 800 с.

16. *Лосев К.Ю.* Информационные особенности жизненного цикла зданий и сооружений // *Вестник евразийской науки*. 2021. Т. 13. № 1. С. 8. EDN YGQTJX.

17. *Грибкова И.С., Екутеч М.В.* BIM на всех этапах жизненного цикла здания // *Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ»*. 2018. № 2. С. 222–234. EDN UPFOMI.

18. *Опарина Л.А., Гриднева Я.А., Барзыгин Е.А.* Оценка эффективности системы управления крупномасштабными строительными проектами в течение их жизненного цикла // *Строительство и архитектура*. 2024. Т. 12. № 1 (42). С. 6. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-12-1-6-6. EDN JRIQAX.

19. *Касимов Р.Г., Каледин О.Д., Дергунова Д.В., Бикматова Э.А.* Энергоэффективность зданий как системный подход к организации его жизненного цикла // *Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : мат. Всеросс. науч.-метод. конф.* 2017. С. 752–756. EDN YKCRPL.

20. Гусаков А.А. и др. Системотехника строительства : энциклопедический словарь / под ред. А.А. Гусакова. 2-е изд., доп. и перераб. М. : Издательство АСВ, 2004. 319 с.

21. Лосев К.Ю. Методологические аспекты жизненного цикла зданий // Вестник евразийской науки. 2019. Т. 11. № 6. С. 76. EDN ATBRHM.

22. Кудрин Б.И. Онтология технической реальности // Философские науки. 2017. № 6. С. 96–103. EDN ZHKEJT.

23. Кияненко К.В. «Биография жилища» как концепт постархитектуры // Жилищные стратегии. 2020. Т. 7. № 3. С. 245–268. DOI: 10.18334/zhs.7.3.111014. EDN FPRZCY.

Поступила в редакцию 2 октября 2024 г.

Принята в доработанном виде 18 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 10 марта 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Викторович Федосов** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий и организации строительного производства, академик РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 1840-8194, РИНЦ ID: 105900, Scopus: 7005670404, ResearcherID: B-2409-2017, ORCID: 0000-0001-6117-7529; fedosovsv@mgsu.ru;

Борис Евгеньевич Нармания — аспирант кафедры технологий и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7486-8316, РИНЦ ID: 932757, Scopus: 57215532142, ORCID: 0000-0002-4644-6353; borisfablee@gmail.com;

Елена Львовна Смирнова — кандидат философских наук, доцент, доцент кафедры философии и социально-гуманитарных дисциплин; **Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ)**; 153000, г. Иваново, Шереметевский пр-т, д. 21; SPIN-код: 2915-2554, РИНЦ ID: 438623; bere8nice@rambler.ru;

Виктория Сергеевна Коновалова — доктор технических наук, доцент, доцент кафедры естественных наук и техносферной безопасности; **Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ)**; 153000, г. Иваново, Шереметевский пр-т, д. 21; SPIN-код: 4880-6146, РИНЦ ID: 731115, Scopus: 57205440333, ResearcherID: S-8237-2018, ORCID: 0000-0003-4088-8318; kotprotiv@yandex.ru;

Наталья Сергеевна Касьяненко — кандидат технических наук, доцент кафедры естественных наук и техносферной безопасности; **Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ)**; 153000, г. Иваново, Шереметевский пр-т, д. 21; SPIN-код: 3373-3546, РИНЦ ID: 558560, Scopus: 57316892000, ORCID: 0000-0003-4088-8318; kasiyanenko@gmail.com

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Bekker P.C.F. A life-cycle approach in building. *Building and Environment*. 1982; 17(1):55-61. DOI: 10.1016/0360-1323(82)90009-9

2. Gustafsson S.-I., Karlsson B.G. Why is life-cycle costing important when retrofitting buildings. *International Journal of Energy Research*. 1988; 12(2):233-242. DOI: 10.1002/er.4440120206

3. Talapov V.V. Some of the principles underlying the BIM. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2016; 4(688):108-114. EDN WEASCN. (rus.).

4. Losev Yu., Losev K. The information modeling features of object-oriented automated technologies in construction. *Construction and Architecture*. 2023; 11(1):16. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-11-1-16-16. EDN DHSMPC. (rus.).

5. Savin M.A., Belash V.V. Application of BIM to buildings and structures life cycle management. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2023; 2(2):42-50. DOI: 10.23947/2949-1835-2023-2-2-42-50. EDN XJRJAJ. (rus.).

6. Yang A., Han M., Zeng Q., Sun Y. Adopting Building Information Modeling (BIM) for the Development of Smart Buildings : a Review of Enabling Applications and Challenges. *Advances in Civil Engineering*. 2021; 2021(1). DOI: 10.1155/2021/8811476

7. Razali M.F., Haron N.A., Hassim S., Alias A.H., Harun A.N., Abubakar A.S. A Review: Application of Building Information Modelling (BIM) over Building Life Cycles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 357(1):012028. DOI: 10.1088/1755-1315/357/1/012028

8. Vasilkova V.V. *Order and chaos in the development of social systems: Synergetics and theory of social self-organization*. St. Petersburg, Lan, 1999; 478. (rus.).
9. Delisle R.G. Cyclicity, Evolutionary Equilibrium, and Biological Progress. *Evolutionary Biology — New Perspectives on Its Development*. 2019; 197-228. DOI: 10.1007/978-3-030-17203-9_7
10. Sizova O., Libin I., Perez-Peraza J. Cycles in economical and biological processes and possible influence of off-site factors on them. *European Journal of Natural History*. 2012; 6:37-40.
11. Kudrin B.I. Studies of technical systems as communities of products — technocenoses. *System research. Methodological problems. Yearbook*. Moscow, Nauka, 1981; 236-254. (rus.).
12. Kudrin B.I. Scientific and technical progress and the formation of technocenoses. *ECO: Economics and organization of industrial production*. 1980; 8:15-28. (rus.).
13. Kudrin B.I. Application of the concepts of biology to describe and predict large systems that are being formed technologically. *Electrification of metallurgical enterprises in Siberia*. 1976; 3:171-204. (rus.).
14. Lovetskii G.I., Aleksandrov M.A. Rhythm as a physical phenomenon and philosophical principle: development of A.L. Chizhevsky's ideas. *Historical, philosophical, political and law sciences, culturology and study of art. Issues of theory and practice*. 2016; 7(69):102-108. (rus.).
15. Shchedrovitsky G.P. *Selected works*. Moscow, Shkola kulturnoy politiki, 1995; 800. (rus.).
16. Losev K.Yu. Buildings and structures life-cycle information specific. *The Eurasian Scientific Journal*. 2021; 13(1):8. EDN YGQTX. (rus.).
17. Gribkova I.S., Yekutech M.V. BIM on all stages of the life cycle of the building. *Electronic network polythematic journal "Scientific Works of KubSTU"*. 2018; 2:222-234. EDN UPFOMI. (rus.).
18. Oparina L., Gridneva Ya., Barzygin E. Assessment of the efficiency of the management system for large-scale construction projects during their life cycle. *Construction and Architecture*. 2024; 12(1):(42):6. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-12-1-6-6. EDN JRIQAX. (rus.).
19. Kasimov R.G., Kaledin O.D., Dergunova D.V., Bikmatova E.A. Energy efficiency of buildings as a systematic approach to the organization of its life cycle. *The University complex as a regional center of education, science and culture : materials of the All-Russian Scientific and Methodological Conference*. 2017; 752-756. EDN YKCRPL. (rus.).
20. Gusakov A.A. et al. *System engineering of construction: an encyclopedic dictionary* / ed. by A.A. Gusakov. 2nd edition, supplemented and revised. Moscow, ASV Publishing House, 2004; 319. (rus.).
21. Losev K.Yu. Buildings life cycle methodology aspects. *The Eurasian Scientific Journal*. 2019; 11(6):76. EDN ATBRHM. (rus.).
22. Kudrin B. Ontology of technical reality. *Russian Journal of Philosophical Sciences*. 2017; 6:96-103. EDN ZHKEJT. (rus.).
23. Kiyanenko K.V. Housing biography as a post-architecture concept. *Russian Journal of Housing Research*. 2020; 7(3):245-268. DOI: 10.18334/zhs.7.3.111014. EDN FPRZCY. (rus.).

Received October 2, 2024.

Adopted in revised form on October 18, 2024.

Approved for publication on March 10, 2025.

B I O N O T E S : **Sergey V. Fedosov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 1840-8194, ID RSCI: 105900, Scopus: 7005670404, ResearcherID: B-2409-2017, ORCID: 0000-0001-6117-7529; fedosovsv@mgsu.ru;

Boris E. Narmaniya — postgraduate student of the Department of Technologies and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 7486-8316, Scopus: 57215532142, ORCID: 0000-0002-4644-6353; borisfablee@gmail.com;

Elena L. Smirnova — Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Philosophy and Social and Humanitarian Disciplines; **Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU)**; 21 Sheremetevskiy ave., Ivanovo, 153000, Russian Federation; SPIN-code: 2915-2554, ID RSCI: 438623; bere8nice@rambler.ru;

Viktoriya S. Konovalova — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Natural Sciences and Technosphere Safety; **Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU)**; 21 Sheremetevskiy ave., Ivanovo, 153000, Russian Federation; SPIN-code: 4880-6146, ID RSCI: 731115, Scopus: 57205440333, ResearcherID: S-8237-2018, ORCID: 0000-0003-4088-8318; kotprotiv@yandex.ru;

Nataliya S. Kasiyanenko — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Natural Sciences and Technosphere Safety; **Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU)**; 21 Sheremetevskiy ave., Ivanovo, 153000, Russian Federation; SPIN-code: 3373-3546, ID RSCI: 558560, Scopus: 57316892000, ORCID: 0000-0003-4088-8318; kasiyanenko@gmail.com.

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

The authors declare no conflicts of interest.

Тенденции обновления городских пространств мегаполисов России в современных условиях

Наталья Григорьевна Верстина, Наталья Николаевна Щепкина,
Владимир Сергеевич Цура

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Современная государственная политика Российской Федерации в сфере обновления городских пространств ориентирована на создание комфортной и безопасной среды для жизни населения; обеспечение безопасных и качественных дорог, улучшение экологического благополучия. Актуальность исследования определяется растущими возможностями мегаполисов России по обновлению городских пространств в данных условиях. В центре исследования анализ тенденций обновления городских пространств мегаполисов России, формирующих перспективы их дальнейшего обновления. Выявлены факторы влияния на обновление городских пространств мегаполисов России, включая парковочные пространства; сформированы современные тенденции их обновления в условиях ориентации на приоритеты государственной политики в данной сфере; установлены статистические взаимосвязи индексов качества городской среды (КГС) с факторами влияния.

Материалы и методы. Решение поставленных задач осуществлялось с использованием различных методов исследования. Применение метода анализа открытых информационных источников, значимых для обновления городских пространств, позволило определить наиболее существенные для исследования государственные документы и информационные ресурсы. На основе анализа статистической информации установлены факторы влияния на обновление городских пространств мегаполисов России. Упорядочивание мегаполисов по различным признакам проводилось с помощью метода систематизации. С целью выявления взаимосвязи индексов КГС мегаполисов России с факторами влияния на обновление городских пространств применялся метод корреляционного анализа. Метод синтеза дал возможность соединить в единое целое информацию о факторах влияния на обновление парковочных пространств мегаполисов России.

Результаты. На основе проведенного анализа факторов влияния на обновление городских пространств определены тенденции обновления городских пространств мегаполисов России. Ранжирование факторов влияния на обновление городских пространств в мегаполисах России по степени их воздействия на обновление городских пространств позволило выявить наиболее значимые факторы влияния.

Выводы. Выявлено, что в современных условиях к выраженным тенденциям обновления городских пространств относятся тенденция обновления жилых пространств, тенденция обновления улично-дорожной сети. Наиболее перспективной становится тенденция обновления парковочных пространств с учетом обеспечения экологической безопасности городской среды путем создания «зеленых парковок».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: городское пространство, городская среда, индекс качества городской среды, обновление городских пространств, мегаполис, тенденции, факторы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Верстина Н.Г., Щепкина Н.Н., Цура В.С. Тенденции обновления городских пространств мегаполисов России в современных условиях // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 4. С. 596–614. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.596-614

Автор, ответственный за переписку: Наталья Николаевна Щепкина, schepkinann@mgsu.ru.

Trends of urban renewal in Russian megacities in modern conditions

Natalia G. Verstina, Natalia N. Shchepkina, Vladimir S. Tsura

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

ABSTRACT

Introduction. The modern state policy of the Russian Federation in the field of urban renewal is focused on improving the quality, comfort and safety of the urban environment. The use of the capabilities of Russian megacities for urban renewal in these conditions is determined by factors influencing the renewal of urban spaces, the importance of which is confirmed by official documents. The research focuses on identifying trends in the renewal of urban spaces in Russia's megacities. In the course of the study, the factors influencing the renewal of urban spaces in Russian megacities were identified, the trends

of their renewal were formed, and the interrelationships of urban environment quality indices with influencing factors were established.

Materials and methods. The tasks were solved using various research methods. The use of the method of analyzing open information sources that are significant for the renewal of urban spaces made it possible to identify the most significant government documents and information resources for the study. Based on the analysis of statistical information, the factors influencing the renewal of urban spaces in Russia's megacities have been identified. The ordering of megacities according to various criteria was carried out using the method of systematization. In order to establish the relationship of the indices of the quality of the urban environment of Russian megacities with the factors influencing the renewal of urban spaces, the method of correlation analysis was used. The synthesis method made it possible to combine information about the factors influencing the renovation of parking spaces in Russian megacities into a whole.

Results. Based on the conducted analysis of factors influencing the renewal of urban spaces, trends in the renewal of urban spaces in Russian megacities were determined. Ranking of factors influencing the renewal of urban spaces in Russian megacities by the degree of their impact on the renewal of urban spaces allowed us to identify the most significant factors of influence.

Conclusions. As a result of the analysis, it was revealed that in modern conditions, the pronounced trends in the renewal of urban spaces include the trend of renewing residential spaces, the trend of renewing the street and road network. The most promising trend is the trend of renewing parking spaces, taking into account the environmental safety of the urban environment by creating "green parking".

KEYWORDS: urban space, urban environment, index of urban environment quality, renewal of urban spaces, megalopolis, trends, factors

FOR CITATION: Verstina N.G., Shchepkina N.N., Tsura V.S. Trends of urban renewal in Russian megacities in modern conditions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(4):596-614. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.596-614 (rus.).

Corresponding author: Natalia N. Shchepkina, schepkinann@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Современная государственная политика Российской Федерации в сфере обновления городских пространств ориентирована на повышение качества, комфорта и безопасности городской среды. Основные направления обновления городских пространств отражены в ряде важнейших государственных документов, определяющих перспективы этого процесса. Так, основополагающим документом, используемым для формирования национальных проектов в сфере обновления городских пространств, ориентированных на достижение показателей и задач национальных целей развития «Комфортная и безопасная среда для жизни», «Экологическое благополучие» является Указ «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года»¹. Согласно данному Указу планируется «обновление к 2030 году жилищного фонда не менее чем на 20 процентов по сравнению с показателем 2019 года»; «поэтапное снижение к 2036 году в два раза выбросов опасных загрязняющих веществ, оказывающих наибольшее негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека, в городах с высоким и очень высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха». Также стоит отметить немаловажную роль в обновлении городских пространств национально-го проекта «Безопасные качественные дороги», реализация которого в 2019–2024 гг. позволила создать

безопасную, современную и комфортную транспортную инфраструктуру в российских городах².

В РФ качество городской среды (КГС), контролируемое Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, оценивается по шести типам городских пространств (рис. 1).

Оценка КГС в разрезе типов городских пространств за период 2019–2023 гг. свидетельствует о наивысших темпах прироста у таких типов городских пространств, как «социально-доступная инфраструктура и прилегающие пространства» (34,8 %), «озелененные пространства» (29,2 %). В то же время наименьшие темпы прироста у таких пространств, как «жилье и прилегающие пространства» (8,8 %), «общегородские пространства» (11,8 %). Промежуточные позиции занимают пространства «улично-дорожная сеть» (16,8 %) и «общественно-деловая инфраструктура и прилегающие пространства» (16,8 %).

Получаемые ежегодно результаты оценки КГС стимулируют государственные структуры постоянно работать над совершенствованием политики по повышению качества отдельных типов городских пространств. В рамках исследования наибольшее внимание уделено анализу двух типов городских пространств — «жилье и прилегающие пространства» и «улично-дорожная сеть», как наиболее значимых для населения с точки зрения повышения качества жизни.

¹ О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года: Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 № 309. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542>

² Национальный проект «Безопасные качественные дороги». URL: <https://bkdrf.ru/>

³ Индекс качества городской среды. URL: <https://индекс-городов.рф/#/>

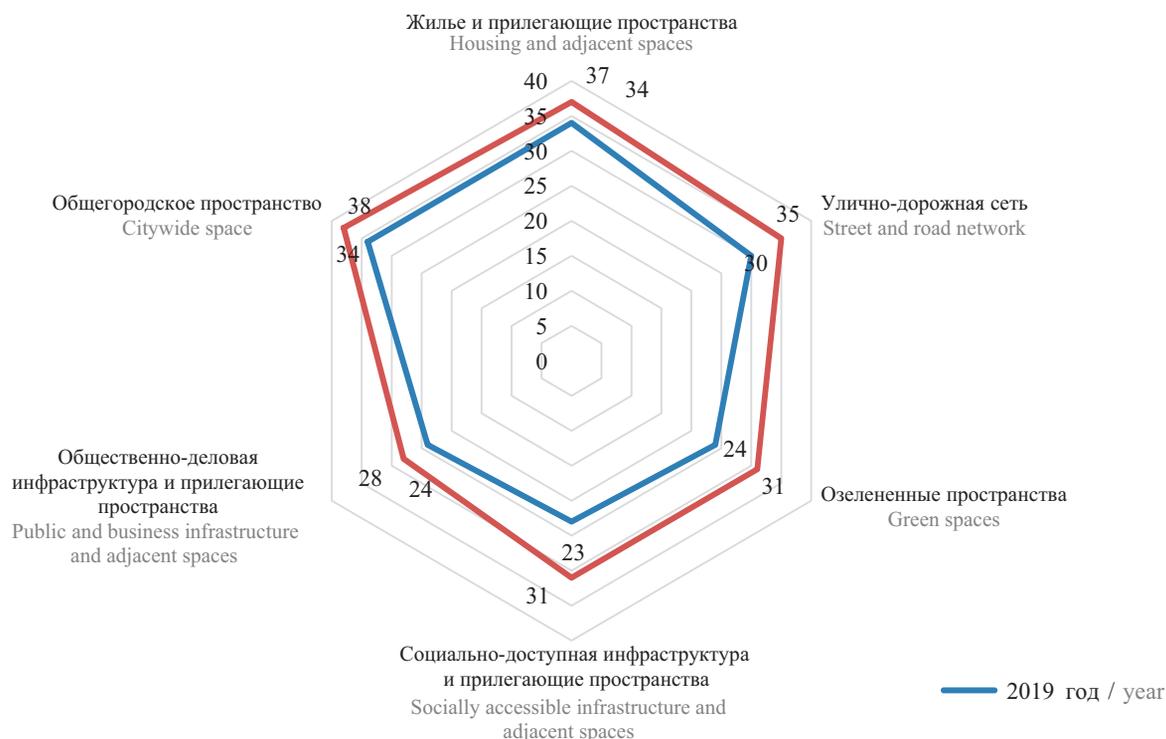


Рис. 1. Качество городской среды в разрезе типов городских пространств за период 2019–2023 гг., балл (по данным портала «Индекс качества городской среды»³)

Fig. 1. The quality of the urban environment in terms of types of urban spaces for the period 2019–2023, score (according to the portal “Urban Environment Quality Index”³)

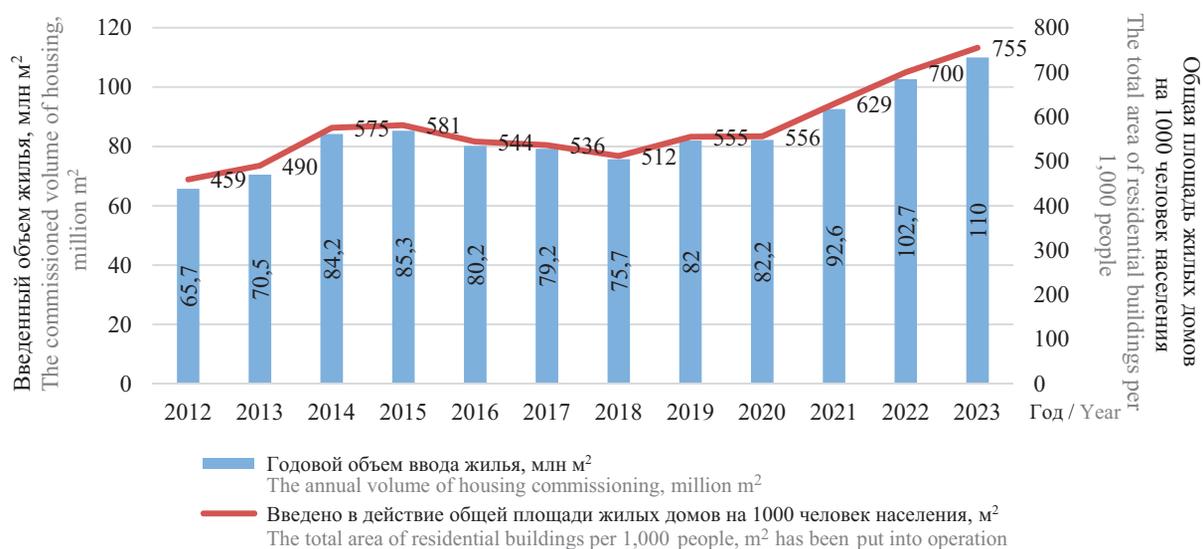


Рис. 2. Динамика ввода объемов жилья в России за период 2012–2023 гг. (по данным Росстата⁴)

Fig. 2. Dynamics of housing commissioning in Russia for the period 2012–2023 (according to Rosstat⁴)

Отметим, что позитивно отражается на повышении качества «жилья и прилегающих пространств» рост годовых объемов введенного жилья за период 2012–2023 гг. на 67,4 % с 459 до 755 млн м²; рост введенной в действие общей площади жилых домов

на 1000 человек населения на 64,5 % с 459 до 755 м² (рис. 2).

Повышение качества «улично-дорожной сети» демонстрирует положительная динамика основных показателей реализации национального проекта «Безопасные качественные дороги». За период 2017–2024 гг. удовлетворенность качеством и доступностью автомобильных дорог возросла на 9 %,

⁴ Федеральная служба государственной статистики (Росстат). URL: <https://rosstat.gov.ru/>

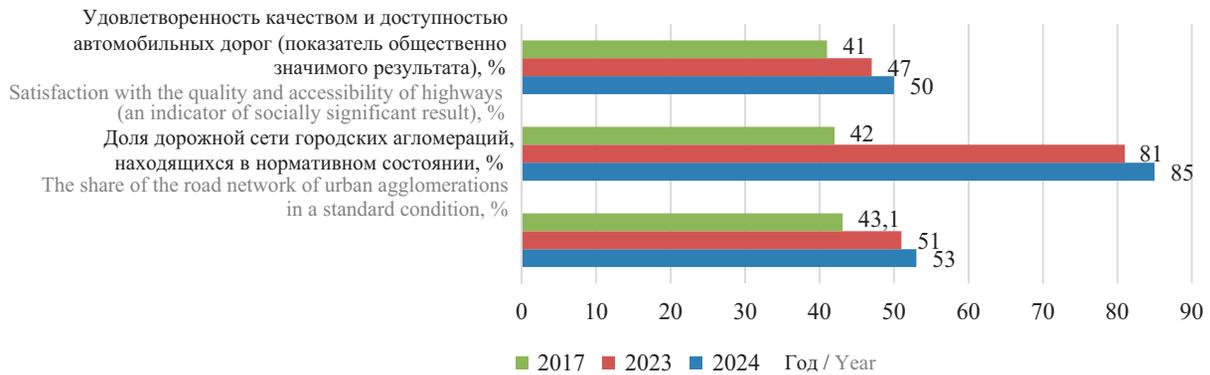


Рис. 3. Динамика основных показателей национального проекта «Безопасные качественные дороги» за период 2017–2023 гг. (по данным портала «Безопасные качественные дороги»²)

Fig. 3. Dynamics of the main indicators of the national project “Safe and high-quality roads” for the period 2017–2023 (according to the portal “Safe and high-quality Roads”²)

доля дорожной сети городских агломераций, находящихся в нормативном состоянии, — на 43 %, доля автомобильных дорог регионального и межмуниципального значения, соответствующих нормативным требованиям, — на 9,9 % (рис. 3).

Вместе с тем, по данным ООО «Дорнадзор», количество городов России с платными парковками возросло за период 2012–2023 гг. с 2 до 24 соответственно⁵. В свою очередь, прогнозные данные Минпромторга России на период 2025–2036 гг. свидетельствуют о росте объемов производства автомобилей на 44,4 % с 732 до 1057 тыс. штук; росте объемов продаж автомобилей — на 23,4 % с 1330 до 1641 тыс. штук соответственно⁶. Данные Росстата демонстрируют увеличение числа городов со среднегодовой концентрацией загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, превышающей предельно допустимую концентрацию за период 2017–2021 гг. на 52 % со 139 до 211; увеличение выбросов загрязняющих веществ от автомобильного автотранспорта за период 2021–2022 гг. на 1 % с 5092 до 5031 тыс. т соответственно.

Процесс развития городов России происходит неравномерно: при высоком уровне урбанизации страны наиболее высокая концентрация городского населения отмечается в мегаполисах России. По данным Федеральной службы государственной статистики (далее Росстат) на 1 января 2024 г. в России насчитывалось 16 мегаполисов, в которых проживает более 25 % российского населения. В современных мегаполисах отмечается:

- прирост численности населения на 1 января 2024 г. на 15 % относительно переписи населения 2010 г. с 30 943 до 35 621 млн чел.;
- прирост среднего значения индекса КГС на 25 % за период 2018–2023 гг. со 163 до 200 баллов;
- прирост объемов введенного жилья на 31 % за период 2020–2023 гг. с 20 644,3 до 27 128,1 тыс. м²;

⁵ Дорнадзор. URL: <https://dornadzor-sz.ru/>

⁶ Минпромторг России. URL: <http://government.ru/departments/54/events/>

- улучшение состояния улично-дорожной сети (УДС) на 26 % за период 2018–2023 гг. с 30,5 до 38,4 баллов;

- прирост среднего уровня автомобилизации на 2 % за период 2021–2023 гг. с 30,8 до 31,3 ед./100 чел.;

- низкая доля платных парковок в УДС, колеблющаяся от 0,2 до 5,8 % в 2023 г.;

- высокий уровень комплексного индекса загрязнения атмосферы в 2023 г.

Одним из целевых показателей национального проекта «Жилье и городская среда» является прирост среднего индекса КГС к 2030 г. на 50 % по отношению к 2019 г. О повышении качества городской среды мегаполисов России за период 2018–2023 гг. свидетельствует темп прироста индекса КГС во всех мегаполисах России (рис. 4). При этом наблюдается достаточная разрозненность значений индекса КГС в мегаполисах России за период 2018–2023 гг. В 2023 г. наименьшее значение индекса КГС, соответствующее 161 баллу, отмечено в г. Омске, наибольшее, соответствующее 304 баллам, — в г. Москве.

Использование возможностей мегаполисов России для обновления городских пространств в условиях повышения КГС определяется факторами влияния на обновление городских пространств, значимость которых подтверждается государственными документами. В этой связи целью исследования является выявление тенденций обновления городских пространств мегаполисов России на основе проведения анализа данных факторов. Достижение поставленной цели обусловлено выполнением в исследовании следующих задач: выявить факторы влияния на обновление городских пространств мегаполисов России; сформировать тенденции обновления городских пространств мегаполисов России; установить взаимосвязи индексов КГС с факторами влияния на обновление городских пространств мегаполисов России.

Проведенный анализ научной литературы показал, что вопросы обновления городских пространств

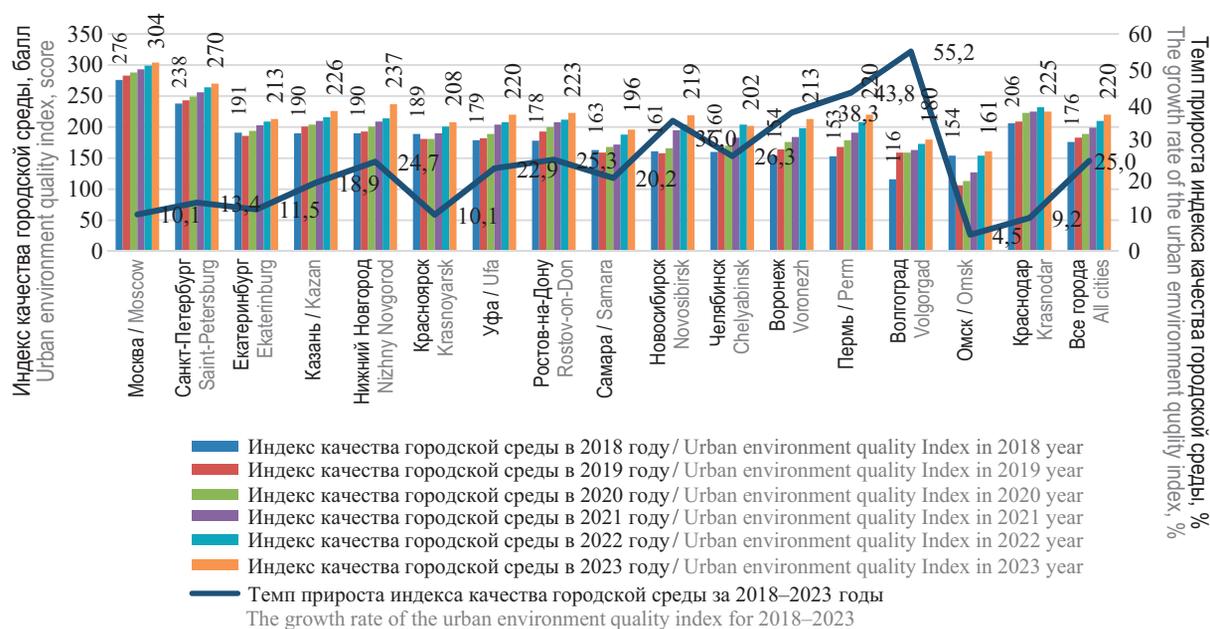


Рис. 4. Динамика индекса качества городской среды мегаполисов России за период 2018–2023 гг., балл (по данным портала «Индекс качества городской среды»)

Fig. 4. Dynamics of the urban environment quality index of Russian megacities for the period 2018–2023, score (according to the portal “Urban Environment Quality Index”)

рассматриваются отечественными и зарубежными учеными с различных позиций. Нормативно-правовое регулирование обновления городских пространств изучается в работах Э.А. Ждановой [1], Л.В. Чайковской [2]. Исследованию методических аспектов оценки качества городских пространств посвящены работы Л.О. Беляевой, К.И. Стрелец [3], Е.Ю. Полякова, Н.И. Ляхова, О.А. Новикова [4], О.В. Нотман [5]. Заинтересованность к региональным аспектам качества городских пространств прослеживается в трудах В.Н. Пуляева, И.А. Ивановой [6], И.А. Секушина [7], Р.А. Гресь [8], Д.А. Липилина, Д.Д. Евтушенко [9]. Вопросы управления городскими общественными пространствами рассматриваются в трудах О.В. Артемовой, А.Н. Савченко [10]. Зарубежные ученые Yujie Ren, Mengdie Zhou, Antian Zhu, Shucheng Shi, Hao Zhu, Yuzhu Chen, Shanshan Li, Tianhui Fan Evolution [11]; Xiaoyu Yu, Zhiwei Yang, Dongmei Xu, Qi Wang, Jian Peng [12] особое внимание уделяют экологическим проблемам при обновлении городских пространств. Различным аспектам обновления городов Китая посвящены труды Chen Shen, Yang Wang, Yan Xu, Xiangyu Li [13]; Kexin Cao, Yu Deng [14]; Xin Zhao, Nan Xia, ManChun Li [15]; Ying Liu, Xuan Chen, Heliang Xiao, Jingjing Duan [16], Wenjian Pan, Juan Du [17]. Политика стимулирования обновления жилых пространств изучается Wen-Kai Wang, I-Chun Tsai [18], Xin Liu [19]. Вопросы обновления поверхности дорожного покрытия рассматриваются V.F. Vázquez, A. Cámara, S.E. Paje [20]. Вместе с тем недостаточно исследованным в экономической литературе

остается вопрос изучения тенденций обновления городских пространств в условиях повышения КГС, что вызывает интерес в рамках данного исследования и обуславливает выбор его темы, цели и задач.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Решение поставленных в исследовании задач осуществлялось в рамках трех последовательных этапов. Первый этап, предусматривающий изучение информационных источников, ориентирован на сбор и систематизацию нормативно-правовой базы, официальных статистических данных в сфере обновления городских пространств мегаполисов России. Второй этап, предполагающий оценку степени влияния факторов на обновление городских пространств мегаполисов России, направлен на определение и ранжирование этих факторов по степени влияния. Третий этап, фокусирующий результаты первых двух этапов, ориентирован на формирование тенденций обновления городских пространств мегаполисов России, учитывающих приоритеты государственной политики в сфере обновления городских пространств и степень воздействия факторов.

В ходе проведения исследования авторами использовались различные методы. Метод анализа открытых информационных источников позволил определить наиболее значимые для исследования обновления городских пространств официальные документы и информационные ресурсы. Среди основных документов, примененных в исследовании,

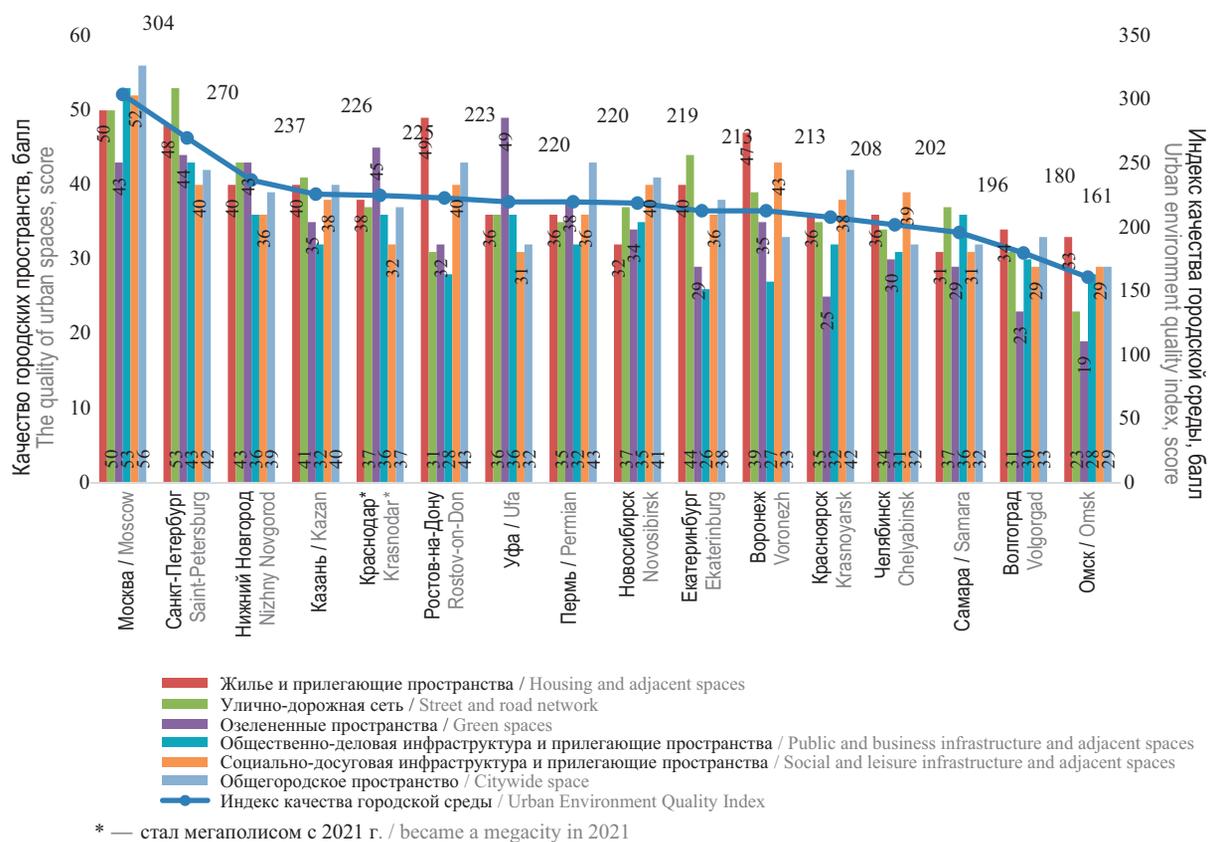


Рис. 5. Систематизация мегаполисов России по качеству городской среды в разрезе городских пространств в 2023 г., в баллах (по данным портала «Индекс качества городской среды»³)

Fig. 5. Systematization of Russian megacities by the quality of the urban environment in the context of urban spaces in 2023, in points (according to the portal “Urban Environment Quality Index”³)

следует отметить следующие: Указ Президента РФ от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года»; Стратегию развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года⁷; Стратегию экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года⁸; Стратегию развития автомобильной промышленности Российской Федерации до 2035 года⁹; Транспортную стратегию

Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года¹⁰. В исследовании использовались данные официальных сайтов Федеральной службы государственной статистики⁴; Дорнадзора⁵; Минпромторга России⁶; порталов «Индекс качества городской среды»³; «Индекс качества жизни в городах России»¹¹; «Безопасные качественные дороги»².

Применение в исследовании метода систематизации позволило ранжировать мегаполисы по различным признакам: качеству городской среды, «жилья и прилегающих пространств», «улично-дорожной сети»; численности населения; объему введенного жилья; доле автомобильных дорог регионального и межмуниципального значения, находящихся в нормативном состоянии; доле автомобильных дорог местного значения, находящихся в нормативном состоянии; по уровню автомобилизации; общему количеству зарегистрированных в городе автомобилей на протяженность УДС; количе-

⁷ Стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года : утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 31.10.2022 № 3268-п. URL: <http://static.government.ru/media/files/AdmXczBBUGfGNM8tz16r7RkQcsgP3LAm.pdf>

⁸ Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года : утв. Указом Президента РФ от 19.04.2017 № 176. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41879>

⁹ Стратегия развития автомобильной промышленности Российской Федерации до 2035 года : утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28.12.2022 № 4261-п. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_436471/19dda8b3222cb2be8a11287c131e6e158c7d005b/

¹⁰ Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 № 3363-п. URL: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf>

¹¹ Индекс качества жизни в городах России. URL: <https://citylifeindex.ru/>

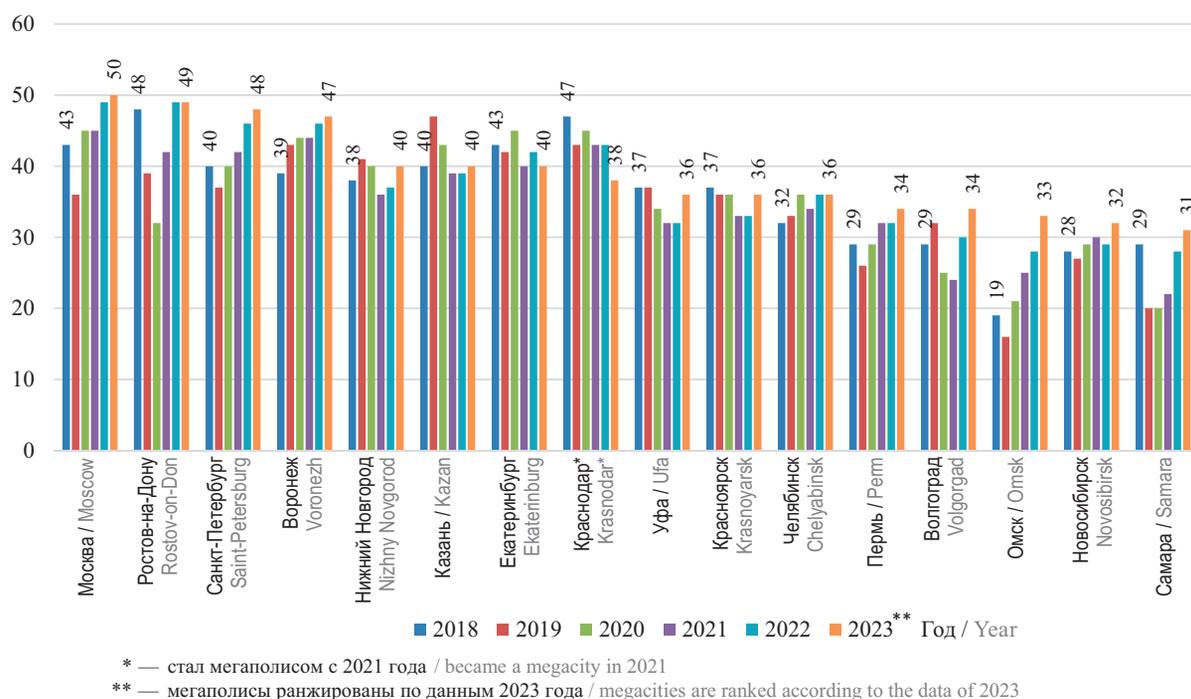


Рис. 6. Систематизация мегаполисов России по качеству «жилья и прилегающих пространств», в баллах (по данным портала «Индекс качества городской среды»³⁾)

Fig. 6. Systematization of Russian megacities by the quality of “housing and adjacent spaces”, in points (according to the portal “Urban Environment Quality Index”³⁾)

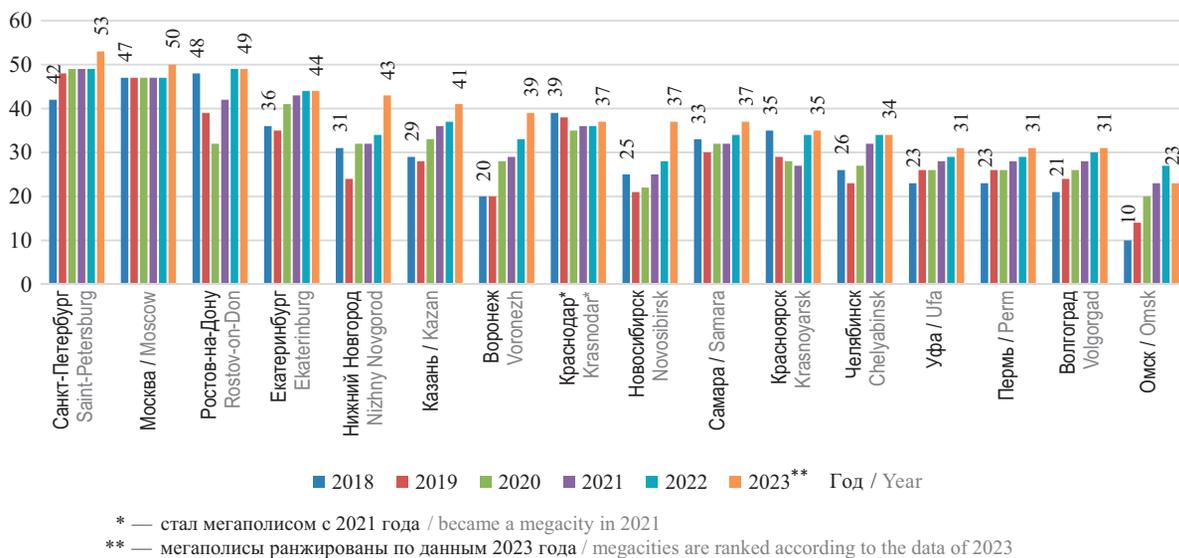


Рис. 7. Систематизация мегаполисов России по качеству «улично-дорожной сети», в баллах (по данным портала «Индекс качества городской среды»³⁾)

Fig. 7. Systematization of Russian megacities by the quality of the “street and road network”, in points (according to the portal “Urban Environment Quality Index”³⁾)

ству размеченных парковочных мест на 10 тыс. чел.; доле платных парковок в уличной дорожной сети; оборачиваемости парковочных мест; комплексному индексу загрязнения атмосферы.

Выполненная систематизация мегаполисов России по КГС в 2023 г. свидетельствует о том, что лидерами по улучшению качества городских пространств являются г. Москва с индексом КГС 304 балла, г. Санкт-Петербург с индексом КГС 270 баллов. При

этом в наибольшей мере во всех мегаполисах улучшалось качество таких пространств, как «жилье и прилегающие пространства» (средний балл 39), «общегородское пространство» (средний балл 38,1) и «улично-дорожная сеть» (средний балл 37,8) (рис. 5).

Систематизация мегаполисов России по качеству «жилья и прилегающих пространств» в 2018–2023 гг. свидетельствует о том, что ключевые позиции

по улучшению качества жилых и прилегающих пространств в 2023 г. занимают города Москва, Ростов-на-Дону, Санкт-Петербург (рис. 6). На протяжении последних трех лет наблюдается рост качества «жилая и прилегающих пространств» в большинстве мегаполисов России.

Систематизация мегаполисов России по качеству «улично-дорожной сети» демонстрирует лидирующие позиции по повышению качества «улично-дорожной сети» в 2023 г. таких городов, как Санкт-Петербург, Москва, Ростов-на-Дону. Также на протяжении последних трех лет наблюдается рост качества «улично-дорожной сети» в большинстве мегаполисов России (рис. 7).

Для установления взаимосвязи индексов КГС мегаполисов России с факторами влияния на обновление городских пространств использовался метод корреляционного анализа. Положительные значения рассчитанных коэффициентов корреляции свидетельствуют о том, что при увеличении значения фактора влияния на обновление городских пространств индекс КГС увеличивается, а отрицательные значения иллюстрируют, что индекс КГС уменьшается. Величина коэффициента корреляции в исследовании интерпретировалась следующим образом: менее $|0,20|$ — очень слабая корреляция; от $|0,20|$ до $|0,39|$ — слабая; от $|0,40|$ до $|0,59|$ — средняя; от $|0,60|$ до $|0,79|$ — сильная; $|0,8|$ и более — очень сильная.

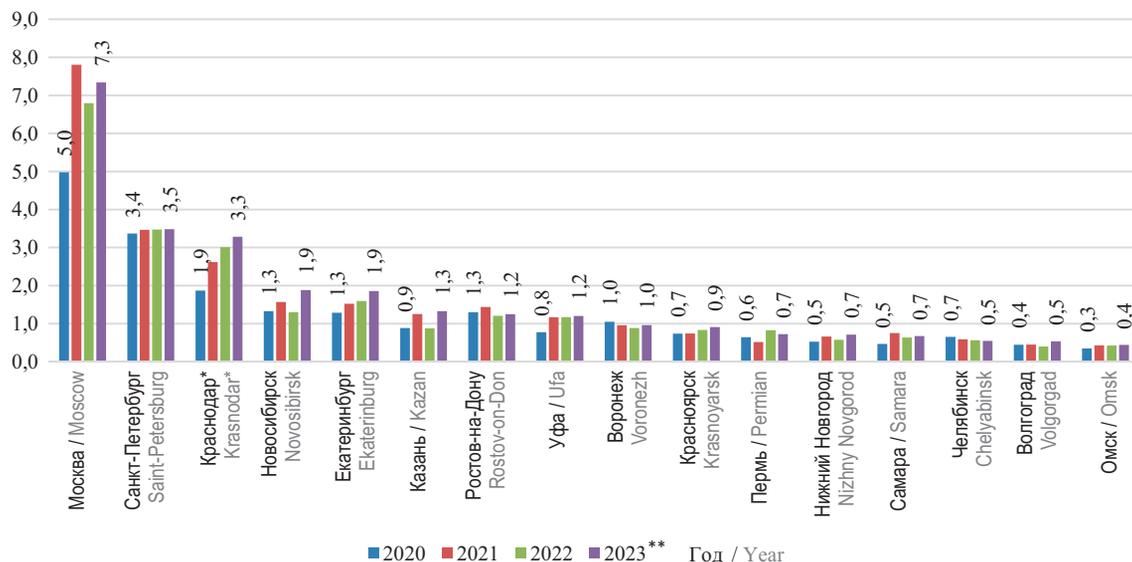
Применение метода синтеза позволило соединить в единое целое информацию о факторах влияния на обновление парковочных пространств мегаполисов России и на этой основе сформировать наиболее перспективные направления обновления городских пространств мегаполисов России.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим воздействие факторов влияния на обновление городских пространств в мегаполисах России и определим основные тенденции обновления городских пространств в них. Одним из факторов влияния является изменение численности населения. Для большинства мегаполисов России характерны темпы прироста населения относительно переписи населения 2010 г. и темпы снижения численности населения относительно переписи 2021 г. По состоянию на 1 января 2024 г. в мегаполисах России проживало 35,6 млн чел. В целом наблюдается положительная тенденция прироста численности населения в мегаполисах России на протяжении периода 2010–2023 гг. на 11,8 %, на протяжении периода 2021–2023 гг. — на 0,3 %. Данные табл. 1 отражают изменение численности населения в мегаполисах России.

Важным фактором влияния на обновление городских пространств мегаполисов России служит рост объема введенного жилья в них. Увеличение объемов введенного жилья способствует улучшению жилищных условий населения мегаполиса. Согласно статистическим данным, наибольшие объемы жилья за период 2020–2023 гг. введены в г. Москве, г. Санкт-Петербурге и г. Краснодаре, а наименьшие — в г. Челябинске, г. Волгограде, г. Омске (рис. 8).

Отметим, что для мегаполисов России характерна нестабильная динамика темпов ввода жилья в 2020–2023 гг. На протяжении 2020–2021 гг. наблюдается наивысший темп прироста объема введенного жилья на 23,3 %, обусловленный восстановлением активности после пандемийного спада в 2019 г. На фоне санкционного давления и геополитической



* — стал мегаполисом с 2021 года / became a megacity in 2021

** — мегаполисы ранжированы по данным 2023 года / megacities are ranked according to the data of 2023

Рис. 8. Систематизация мегаполисов России по объему введенного жилья, тыс. м² (по данным Росстата⁴)

Fig. 8. Systematization of Russian megacities by the volume of commissioned housing, thousand square meters (according to Rosstat⁴)

Табл. 1. Систематизация мегаполисов России по численности населения (по данным Росстата⁴)Table 1. Systematization of Russian megacities by population (according to Rosstat⁴)

Место* Place*	Город City	Численность населения, млн чел. Population, million people			Темпы прироста (снижения) численности населения, % The rate of population growth (decrease), %	
		Официальные окончательные итоги переписи населения 2010 г. Official final results of the population census in 2010	Официальные окончательные итоги переписи населения 2021 г. Official final results of the population census in 2021	Официальные данные Росстата на 1 января 2024 г. Official data from Rosstat as of January 1 in 2024	Относи- тельно переписи 2010 г. Regarding the census in 2010	Относи- тельно переписи 2021 г. Regarding the census in 2021
1	Москва / Moscow	11 504	13 010	13 150	14,3	1,1
2	Санкт-Петербург Saint-Petersburg	4880	5602	5598	14,7	-0,1
3	Новосибирск Novosibirsk	1474	1634	1634	10,9	0,0
4	Екатеринбург Ekaterinburg	1350	1544	1536	13,8	-0,5
5	Казань / Kazan	1144	1309	1319	15,3	0,8
6	Красноярск Krasnoyarsk	977	1188	1205	23,3	1,4
7	Нижний Новгород Nizhniy Novgorod	1251	1226	1205	-3,7	-1,7
8	Челябинск Chelyabinsk	1130	1190	1177	4,2	-1,1
9	Уфа / Ufa	1062	1145	1163	9,5	1,6
10	Самара / Samara	1169	1173	1159	-0,9	-1,2
11	Ростов-на-Дону Rostov-on-Don	1089	1142	1140	4,7	-0,2
12	Краснодар** Krasnodar**	764	1099	1139	49,1	3,6
13	Омск / Omsk	1166	1126	1104	-5,3	-2,0
14	Воронеж Voronezh	890	1058	1046	17,5	-1,1
15	Пермь / Permian	991	1034	1027	3,6	-0,7
16	Волгоград Volgograd	1021	1028	1019	-0,2	-0,9
	Итого	31 862	35 508	35 621	11,8	0,3

Примечание: * — мегаполисы ранжированы по данным на 1 января 2024 г.; ** — стал мегаполисом с 2021 г.

Note: * — megacities are ranked according to data as of January 1, 2024; ** — became a megacity in 2021.

нестабильности в 2021–2022 гг. отмечается резкое снижение ввода жилья в большинстве мегаполисов России на 4,9 %. В 2022–2023 гг. ситуация начинает стабилизироваться и прирост темпов ввода жилья в мегаполисах России повышается до 9,6 %, что свидетельствует об адаптации строительных организаций к новым условиям внешней среды (рис. 9).

Приведенные данные демонстрируют выраженную тенденцию обновления жилых пространств в мегаполисах России, отражающую стимулирование роста объемов введенного жилья в них. Долго-

срочные перспективы развития жилищного строительства прослеживаются в Указе «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года», предусматривающем в рамках достижения национальной цели «комфортная и безопасная среда для жизни» обеспечение граждан жильем общей площадью не менее 33 м² на человека к 2030 г. и не менее 38 м² к 2036 г.; обновление к 2030 г. жилищного фонда не менее чем на 20 % по сравнению с показателем 2019 г.; в Стратегии развития строительной отрасли

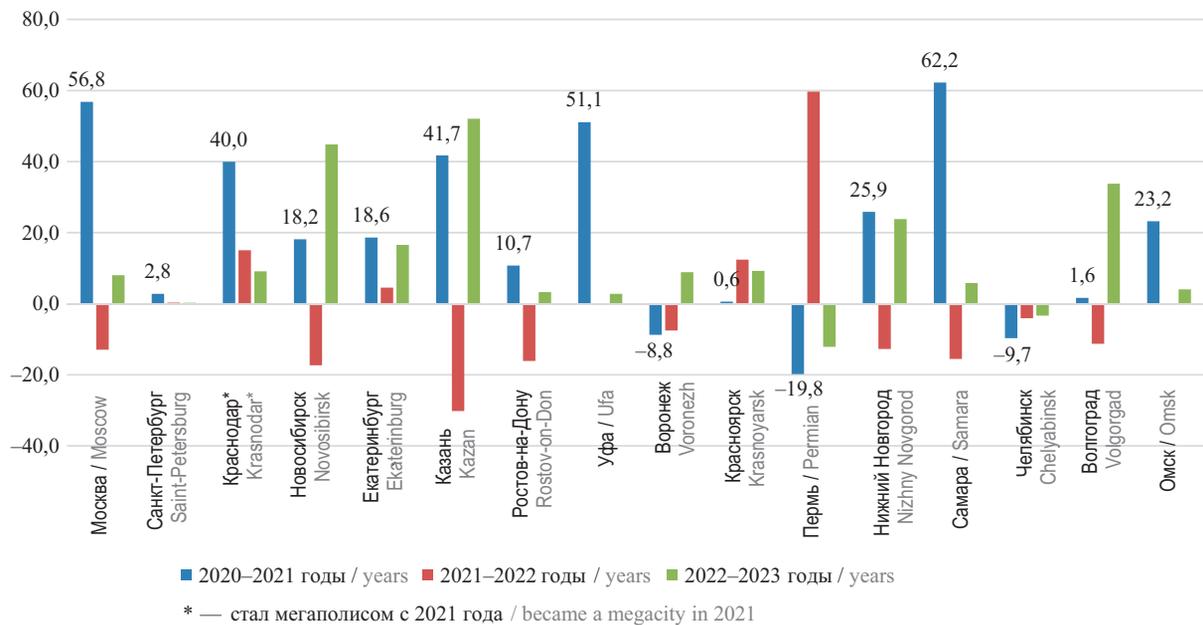


Рис. 9. Темпы годового прироста (снижения) объемов введенного жилья в мегаполисах России за период 2020–2023 гг. (по данным Росстата⁴)

Fig. 9. The rate of annual increase (decrease) in the volume of commissioned housing in Russian megacities for the period 2020–2023 (according to Rosstat⁴)

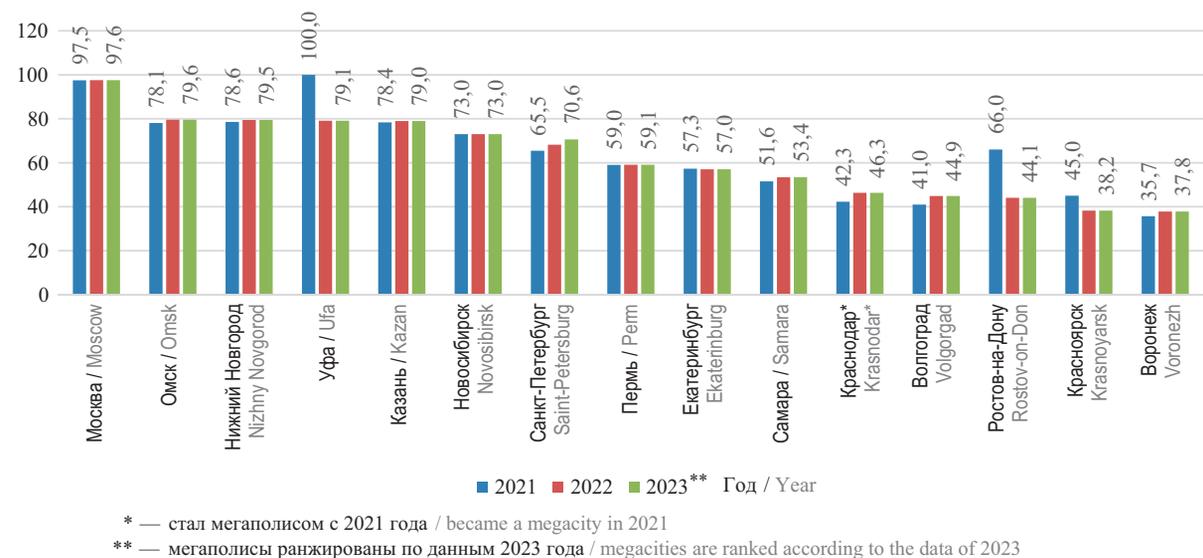


Рис. 10. Систематизация мегаполисов России по доли автомобильных дорог регионального и межмуниципального значения, находящихся в нормативном состоянии, % (по данным портала «Индекс качества жизни в городах России»¹¹)

Fig. 10. Systematization of Russian megacities by the share of regional and inter-municipal roads in a standard condition, % (according to the portal “Quality of Life Index in Russian Cities”¹¹)

и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года, предполагающей ввод более 1 млрд м² жилья (за 2021–2030 гг.), в том числе многоквартирных домов не менее 550 млн м².

Существенным фактором влияния на обновление городских пространств мегаполисов России является изменение доли автомобильных дорог регионального и межмуниципального значения, соот-

ветствующих нормативному состоянию, в их общей протяженности. В результате реализации национального проекта «Безопасные качественные дороги» за период 2018–2024 гг., к которому в 2021 г. присоединился г. Санкт-Петербург, состояние автомобильных дорог регионального и межмуниципального значения в мегаполисах России значительно улучшилось (рис. 10). Увеличение доли автомобильных дорог регионального и межмуниципального

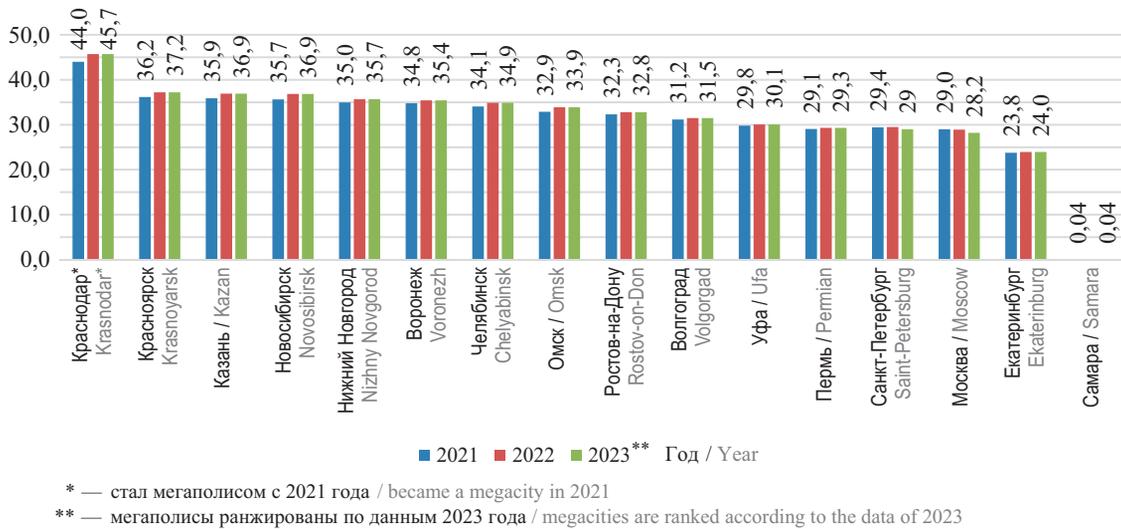


Рис. 11. Систематизация мегаполисов России по уровню автомобилизации, ед./100 чел. (по данным портала «Индекс качества жизни в городах России»¹¹⁾)

Fig. 11. Classification of Russian megacities by level of motorization, units/100 people (according to the portal “Quality of Life Index in Russian Cities”¹¹⁾)

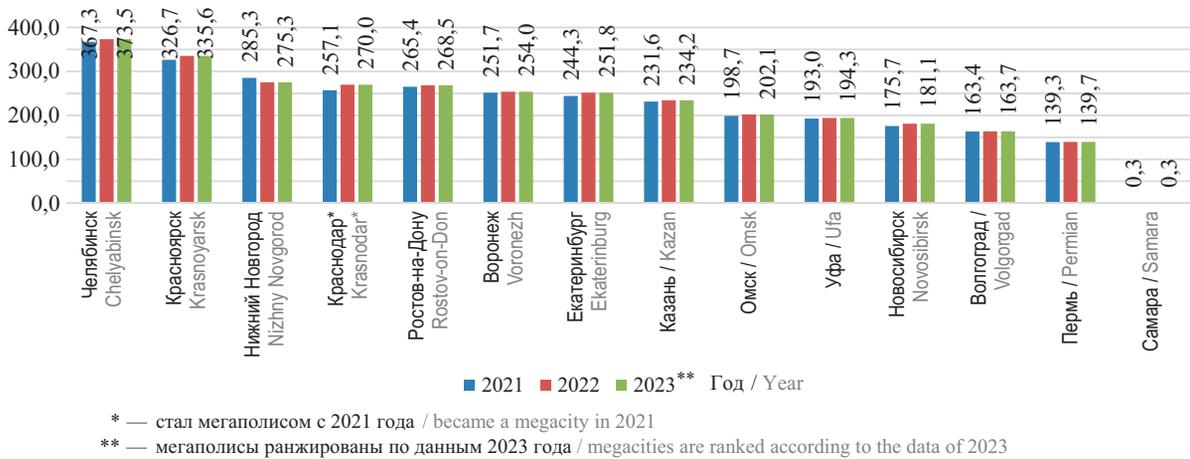


Рис. 12. Систематизация мегаполисов России по количеству зарегистрированных в городе автомобилей на протяженность улично-дорожной сети, ед./км², кроме г. Москвы и г. Санкт-Петербурга (по данным портала «Индекс качества жизни в городах России»¹¹⁾)

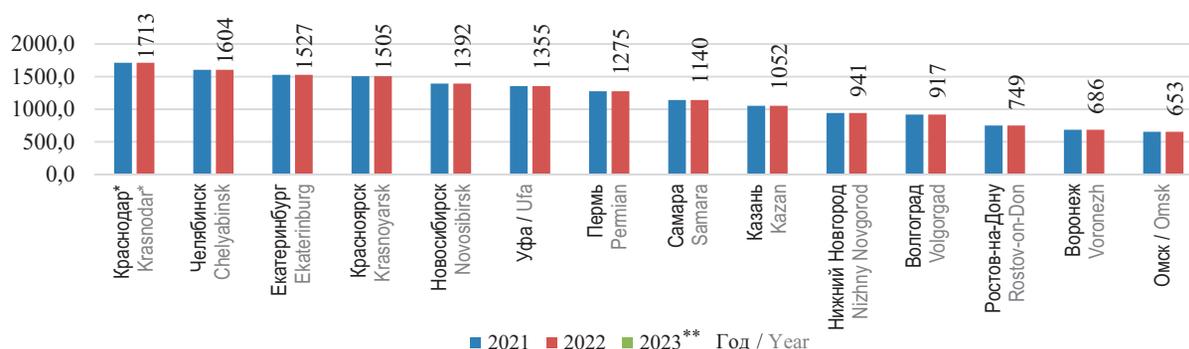
Fig. 12. Systematization of Russian megacities by the number of cars registered in the city per length of the street and road network, units/ km², except for Moscow and St. Petersburg (according to the portal “Quality of Life Index in Russian Cities”¹¹⁾)

значения, соответствующих нормативному состоянию, положительно отражается на качестве городской среды мегаполисов России.

Абсолютным лидером по качеству дорог на протяжении 2021–2023 гг. среди мегаполисов России стала Москва с показателем доли автомобильных дорог общего пользования регионального или межмуниципального значения, отвечающих нормативным требованиям, 97,6 %. Наихудшее качество дорог отмечается в г. Воронеже с показателем доли автомобильных дорог общего пользования регионального или межмуниципального значения, отвечающих нормативным требованиям, 38,2 %. В 2022 г. в большинстве мегаполисов России произошло увеличение доли дорог региональ-

ного и межмуниципального значения, находящихся в нормативном состоянии. Существенное снижение доли автомобильных дорог регионального и межмуниципального значения, отвечающих нормативным требованиям, наблюдается в г. Ростове-на-Дону и г. Уфе на 22 и 20,9 % соответственно. В 2023 г. увеличение доли автомобильных дорог регионального и межмуниципального значения, отвечающих нормативным требованиям, демонстрирует только г. Санкт-Петербург — на 2,4 %.

Еще один фактор воздействия на обновление городских пространств мегаполисов России — изменение уровня автомобилизации населения мегаполисов России (рис. 11). В Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Феде-



* — стал мегаполисом с 2021 года / became a megacity in 2021

** — мегаполисы ранжированы по данным 2023 года / megacities are ranked according to the data of 2023

Рис. 13. Систематизация мегаполисов России по количеству размеченных парковочных мест на 10 тыс. человек, ед./10 тыс. чел. (по данным портала «Индекс качества жизни в городах России»¹¹, кроме г. Москвы и г. Санкт-Петербурга)

Fig. 13. Systematization of Russian megacities by the number of marked parking spaces per 10 thousand people, units/10 thousand people (according to the portal “Quality of Life Index in Russian Cities”¹¹, except for Moscow and St. Petersburg)

рации до 2035 года обозначены прогнозные данные по увеличению за 2025–2035 гг. объемов производства автомобилей на 44,4 %; объемов продаж автомобилей — на 23,4 %.

Систематизация мегаполисов России по уровню автомобилизации свидетельствует о том, что наивысший уровень автомобилизации, соответствующий 45,7 ед./100 чел., отмечен в г. Краснодаре, а низший, соответствующий 0,04 ед./100 чел., — в г. Самаре. В 2023 г. в большинстве мегаполисов России наблюдается повышение уровня автомобилизации, что приводит к возникновению проблем с парковочными пространствами.

Не менее значимым фактором влияния на обновление городских пространств мегаполисов России является изменение общего количества зарегистрированных в городе автомобилей на протяженность УДС (рис. 12). Наивысший темп прироста за период 2021–2023 гг. общего количества зарегистрированных в городе автомобилей на протяженность УДС отмечен в г. Краснодаре (5,0 %), г. Екатеринбурге (3,05 %), г. Новосибирске (3,07 %). Темп снижения наблюдается в г. Самаре (на 3,7 %) и г. Нижнем Новгороде (на 3,5 %) (рис. 13).

Ведущие позиции среди мегаполисов России в 2023 г. по общему количеству зарегистрированных в городе автомобилей на протяженность улично-дорожной сети занимают г. Челябинск — 373,5 автомобиля на 1 км², г. Красноярск — 335,6 автомобиля на 1 км², г. Нижний Новгород — 275,3 автомобиля на 1 км². Наименьшее общее количество зарегистрированных в городе автомобилей на протяженность УДС отмечено в г. Самаре — 0,3 автомобиля на 1 км².

Таким образом, можно определить еще одну тенденцию обновления городских пространств — обновление улично-дорожной сети, проявляющееся в значительном росте обновленных дорог общего пользования регионального или межмуниципального значения, отвечающих нормативным требовани-

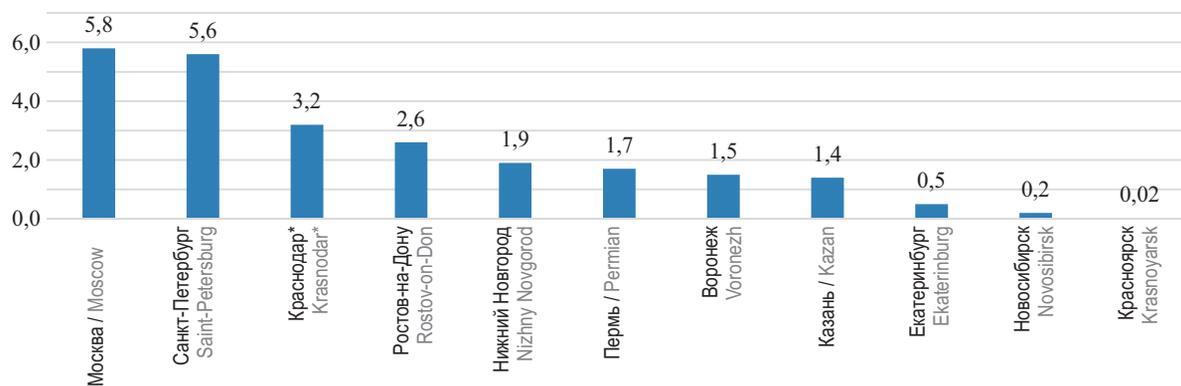
ям; а также учитывающее повышение уровня автомобилизации в мегаполисах России, повышение общего количества зарегистрированных в городе автомобилей на протяженность УДС.

На повышение КГС мегаполисов России влияет изменение количества размеченных парковочных мест на 10 тыс. чел. (рис. 13). Первую тройку лидеров по количеству размеченных мест возглавляют г. Краснодар с 1713 размеченными парковочными местами на 10 тыс. чел., г. Челябинск с 1604 размеченными парковочными местами на 10 тыс. чел., г. Екатеринбург с 1527 размеченными парковочными местами на 10 тыс. чел. Увеличение количества размеченных парковочных мест положительно влияет на качество городской среды мегаполисов России.

Следующий фактор влияния на обновление городских пространств — изменение доли платных парковок в УДС мегаполисов России. Увеличение доли платных парковок в улично-дорожной сети положительно влияет на КГС мегаполисов России. Наибольшая доля парковок в УДС в 2023 г. отмечается у г. Москвы и г. Санкт-Петербурга, наименьшая — у г. Екатеринбурга, г. Новосибирска, г. Красноярска (рис. 14).

Оборачиваемость парковочных мест, т.е. показатель того, сколько раз владельцы автотранспортных средств воспользовались одним и тем же парковочным местом, служит еще одним фактором, влияющим на КГС мегаполисов России. Повышение оборачиваемости парковочных мест способствует наличию свободных парковочных мест даже в периоды высокого спроса на них, что положительно сказывается на качестве городской среды мегаполисов России. Наибольшая оборачиваемость парковочных мест наблюдается в г. Москве, г. Казани, наименьшая — в г. Красноярске, г. Ростове-на-Дону (рис. 15).

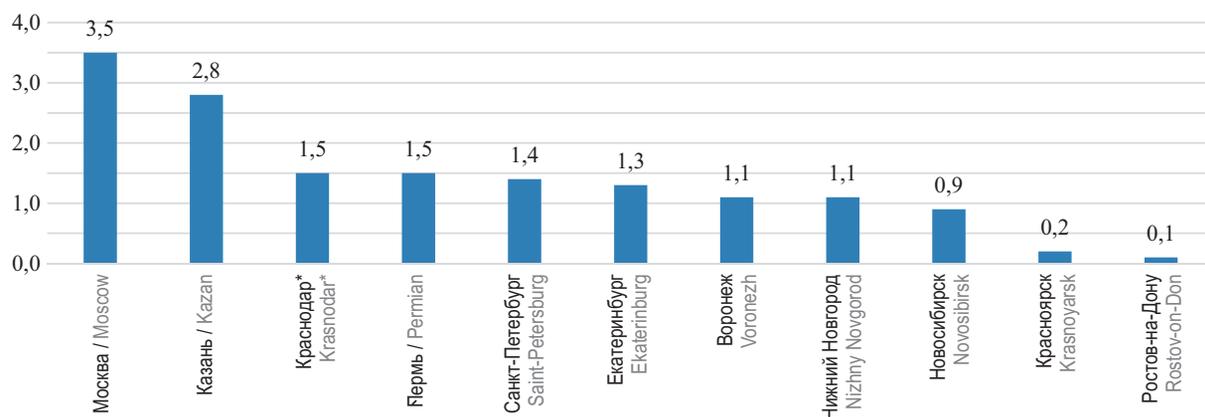
Одним из факторов влияния на обновление городских пространств мегаполисов России является комплексный индекс загрязнения атмосферы,



* — стал мегаполисом с 2021 г. / became a megacity in 2021

Рис. 14. Систематизация мегаполисов по доле платных парковок в уличной дорожной сети в 2023 г. (по данным портала «Индекс качества жизни в городах России»¹¹⁾)

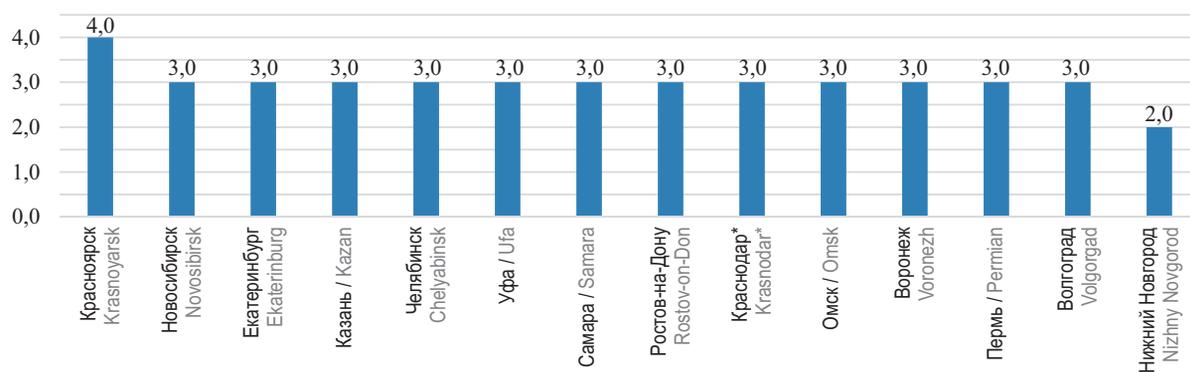
Fig. 14. Classification of megacities by the share of paid parking in the street road network in 2023 (according to the portal “Quality of Life Index in Russian Cities”¹¹⁾)



* — стал мегаполисом с 2021 г. / became a megacity in 2021

Рис. 15. Систематизация мегаполисов России по оборачиваемости парковочных мест, в баллах (по данным портала «Индекс качества жизни в городах России»¹¹⁾)

Fig. 15. Systematization of Russian megacities by parking space turnover, in points (according to the portal “Quality of Life Index in Russian Cities”¹¹⁾)



* — стал мегаполисом с 2021 г. / became a megacity in 2021

Рис. 16. Систематизация мегаполисов России по комплексному индексу загрязнения атмосферы в 2023 г., баллы, кроме г. Москвы и г. Санкт-Петербурга (по данным портала «Индекс качества жизни в городах России»¹¹⁾)

Fig. 16. Systematization of Russian megacities by the comprehensive air pollution index in 2023, points (except for Moscow and St. Petersburg, according to the portal “Quality of Life Index in Russian Cities”¹¹⁾)

Табл. 2. Парная линейная корреляция значений индекса качества городской среды мегаполисов России с факторами влияния на обновление городских пространств (по данным Росстата⁴, портала «Индекс качества городской среды»³, портала «Индекс качества жизни в городах России»¹¹)

Table 2. Paired linear correlation of the values of the urban environment quality index of Russian megacities with factors influencing the renewal of urban spaces (according to Rosstat⁴, the portal “Urban Environment Quality Index”³, the portal “Quality of Life Index in Russian Cities”¹¹)

Факторы влияния на обновление городских пространств Factors influencing the renewal of urban spaces	Значение коэффициента корреляции/тип корреляции Correlation coefficient value/correlation type			
	2020 год / year	2021 год / year	2022 год / year	2023 год / year
Изменение численности населения мегаполиса, миллион человек Change in the population of a megalopolis, million people	0,76 Сильная положительная корреляция Strong positive correlation	0,78 Сильная положительная корреляция Strong positive correlation	0,83 Очень сильная положительная корреляция Very strong positive correlation	0,81 Очень сильная положительная корреляция Very strong positive correlation
Изменение объемов введенного жилья в мегаполисе, тыс. м ² Changes in the volume of housing commissioned	0,87 Очень сильная положительная корреляция Very strong positive correlation	0,86 Очень сильная положительная корреляция Very strong positive correlation	0,86 Очень сильная положительная корреляция Very strong positive correlation	0,84 Очень сильная положительная корреляция Very strong positive correlation
Изменение доли автомобильных дорог местного значения, находящихся в нормативном состоянии, % Change in the proportion of local highways that are in a standard condition, %	0,005 Очень слабая положительная корреляция Very weak positive correlation	0,08 Очень слабая положительная корреляция Very weak positive correlation	-0,07 Очень слабая отрицательная корреляция Very weak positive correlatio	0,07 Очень слабая положительная корреляция Very weak positive correlation
Изменение уровня автомобилизации населения мегаполиса, ед./100 чел. Change in the level of motorization, units/100 people	–	0,13 Очень слабая положительная корреляция Very weak positive correlation	0,09 Очень слабая положительная корреляция Very weak positive correlatio	0,06 Очень слабая положительная корреляция Very weak positive correlation
Изменение общего количества зарегистрированных в мегаполисе автомобилей на протяженность улично-дорожной сети, ед./км ² Change in the total number of cars registered in the city by the length of the road network, units/km ²	0,12 Очень слабая положительная корреляция Very weak positive correlation	0,31 Слабая положительная корреляция Weak positive correlation	–	0,27 Слабая положительная корреляция Weak positive correlation
Изменение количества размеченных парковочных мест в мегаполисе, ед./10 тыс. чел. Change in the number of marked parking spaces in a megalopolis by 10 thousand people, units/10 thousand people	–	–	0,34 Слабая положительная корреляция Weak positive correlation	0,37 Слабая положительная корреляция Weak positive correlation
Изменение доли платных парковок в уличной дорожной сети мегаполиса, % Changes in the share of paid parking in the megacity’s street road network, %	–	–	–	0,8 Очень сильная положительная корреляция Very strong positive correlation
Изменение оборачиваемости парковочных мест в мегаполисе Changing the turnover of parking spaces in a megalopolis	–	–	–	0,45 Средняя положительная корреляция Average positive correlation
Изменение комплексного индекса загрязнения атмосферы в мегаполисе, балл Change in the complex index of atmospheric pollution in a megalopolis, point	–	-0,16 Очень слабая отрицательная корреляция Very weak negative correlation	-0,13 Очень слабая отрицательная корреляция Very weak negative correlation	-0,28 Слабая отрицательная корреляция Very weak negative correlation

Табл. 3. Ранжирование факторов влияния на обновление городских пространств в 2023 г.

Table 3. Ranking of factors influencing urban renewal in 2023

Факторы, влияющие на обновление городских пространств Factors influencing the renewal of urban spaces	Значение коэффициента корреляции The value of the correlation coefficient
Изменение объемов введенного жилья в мегаполисе, тыс. м ² Changes in the volume of housing commissioned	0,84
Изменение численности населения Change in the population of a megalopolis, million people	0,81
Изменение доли платных парковок в уличной дорожной сети мегаполиса, % Changes in the share of paid parking in the megacity's street road network, %	0,80
Изменение оборачиваемости парковочных мест в мегаполисе Changing the turnover of parking spaces in a megalopolis	0,45
Изменение количества размеченных парковочных мест в мегаполисе, ед./10 тыс. чел. Change in the number of marked parking spaces in a megalopolis by 10 thousand people, units/10 thousand people	0,37
Изменение комплексного индекса загрязнения атмосферы в мегаполисе, балл Change in the complex index of atmospheric pollution in a megalopolis, point	-0,28
Изменение общего количества зарегистрированных в мегаполисе автомобилей на протяженность УДС, ед./км ² Change in the total number of cars registered in the city by the length of the road network, units/km ²	0,27
Изменение доли автомобильных дорог местного значения, находящихся в нормативном состоянии, % Change in the proportion of local highways that are in a standard condition, %	0,07
Изменение уровня автомобилизации населения мегаполиса, ед./100 чел. Change in the level of motorization, units/100 people	0,06

оцениваемый как «высокий» в большинстве из них (рис. 16).

Негативное влияние данного фактора может усилиться на фоне повышения уровня автомобилизации населения в мегаполисах России. Что, в свою очередь, потребует обновления парковочных пространств с учетом обеспечения экологической безопасности городской среды путем создания «зеленых» парковок на их территории для снижения негативного воздействия выбросов от автомобильных транспортных средств на окружающую среду. Таким образом, эта тенденция демонстрирует свою перспективность, а ее значимость подтверждается Указом «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года», в рамках которого достижение национальной цели «экологическое благополучие» обусловлено снижением выбросов загрязняющих веществ, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека в городах с высоким и очень высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха.

Решение задачи по установлению взаимосвязи индекса КГС с факторами влияния на обновление городских пространств мегаполисов России осуществлялось с помощью метода корреляционного анализа, позволяющего установить как положительные, так и отрицательные зависимости. Результаты парной линейной корреляции индекса КГС мегапо-

лисов России и факторов влияния на обновление городских пространств представлены в табл. 2.

На протяжении 2020–2023 гг. отмечаются сильная и очень сильная положительные корреляции значений индекса КГС мегаполисов России и значений показателей численности населения, объема введенного жилья. В 2023 г. также наблюдается очень сильная положительная корреляция значений индекса КГС и значений доли платных парковок в УДС мегаполисов. Данные зависимости свидетельствуют о том, что при увеличении значений этих показателей значения индекса КГС мегаполисов России также увеличиваются. В 2023 г. прослеживается средняя положительная корреляция значений индекса КГС и значений оборачиваемости парковочных мест. На протяжении 2022–2023 гг. наблюдается усиливающаяся слабая положительная корреляция значений индекса КГС и значений количества размеченных парковочных мест на 10 тыс. чел. Очень слабая как положительная, так и отрицательная корреляция значений индекса КГС и значений доли автомобильных дорог местного значения, находящихся в нормативном состоянии, наблюдается в 2020–2023 гг. Очень слабая положительная корреляция значений индекса КГС и уровня автомобилизации населения мегаполисов отмечается на протяжении 2021–2023 гг. Усиливающаяся за 2021–2023 гг. очень слабая отрицательная корреляция индекса КГС и комплексного индекса

загрязнения атмосферы свидетельствует о том, что при увеличении значений комплексного индекса загрязнения атмосферы в мегаполисах значение индекса качества их городской среды уменьшается.

В табл. 3 приведены значения коэффициентов корреляции, отражающие статистическую взаимосвязь индекса КГС мегаполисов России и факторов влияния на обновление городских пространств в порядке убывания их степени влияния в 2023 г.

На основе осуществленного в табл. 3 ранжирования факторов влияния на обновление городских пространств мегаполисов России можно отметить, что к факторам наибольшего влияния в 2023 г. относятся: изменение объема введенного жилья в мегаполисе, изменение численности населения мегаполиса, изменение доли платных парковок в уличной дорожной сети мегаполиса. Наименьшее значение влияния на обновление городских пространств оказывают такие факторы, как изменение доли автомобильных дорог местного значения, находящихся в нормативном состоянии, и изменение уровня автомобилизации населения мегаполисов. Степень воздействия данных факторов необходимо учитывать при формировании тенденций обновления городских пространств мегаполисов России.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведения анализа статистической информации определены факторы влияния на обновление городских пространств мегаполисов России, такие как: изменение объемов введенного жилья в мегаполисе; изменение доли автомобильных дорог местного значения, находящихся в нормативном состоянии; изменение уровня автомобилизации населения мегаполиса; изменение общего количества зарегистрированных в мегаполисе автомобилей на протяженность УДС; изменение количества размеченных парковочных мест в мегаполисе на 10 тыс. чел.; изменение доли платных парковок в УДС мегаполиса; изменение оборачиваемости парковочных мест в мегаполисе.

На основе выполненного анализа факторов влияния на обновление городских пространств

определены тенденции обновления городских пространств мегаполисов России, значимость которых подтверждается официальными документами в данной сфере. В современных условиях к ярко выраженным тенденциям обновления городских пространств относятся тенденция обновления жилых пространств и тенденция обновления УДС. Наиболее перспективной становится тенденция обновления парковочных пространств с учетом обеспечения экологической безопасности городской среды путем создания «зеленых парковок».

Установленная взаимосвязь индекса КГС с факторами влияния на обновление городских пространств мегаполисов России демонстрирует положительные корреляции разной степени связи с такими факторами, как изменение численности населения; изменение объемов введенного жилья; изменение доли автомобильных дорог местного значения, находящихся в нормативном состоянии; изменение уровня автомобилизации; изменение общего количества зарегистрированных в городе автомобилей на протяженность УДС; изменение количества размеченных парковочных мест на 10 тыс. чел.; изменение доли платных парковок в УДС; изменение оборачиваемости парковочных мест. С фактором изменения значения комплексного индекса загрязнения атмосферы в мегаполисе прослеживается отрицательная корреляционная зависимость.

Ранжирование факторов влияния на обновление городских пространств в мегаполисах России по степени их воздействия на обновление городских пространств позволило выявить наиболее значимые факторы влияния в 2023 г., такие как изменение объемов введенного жилья в мегаполисах, изменение численности населения мегаполиса, изменение доли платных парковок в УДС мегаполиса.

Перспективные направления дальнейших исследований могут характеризоваться изучением особенностей управления проектами обновления парковочных пространств в мегаполисах России, связанных с созданием «зеленых парковок», с учетом интересов и взаимодействия органов местного самоуправления, субъектов бизнеса и социума.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Жданова А.Э.* Формирование комфортной городской среды : обзор нормативно-правового поля // Экономика. Социология. Право. 2023. № 2 (30). С. 9–18. DOI: 10.22281/2542-1697-2023-02-02-09-18. EDN QJORGJN.

2. *Чайковская Л.В.* Правовое регулирование формирования комфортной городской среды в Российской Федерации : автореф. дис. ... канд. юридических наук. Курск, 2024. 28 с.

3. *Беляева Л.О., Стрелец К.И.* Оценка комфортности городской среды // Russian Journal of Construction Science and Technology. 2023. Т. 9. № 1. С. 33–47. DOI: 10.15826/rjcast.2023.1.004. EDN KVTRPI.

4. *Полякова Е.Ю., Ляхова Н.И., Новикова О.А.* Методология оценки качества и комфортности городской среды // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2021. № 11–2. С. 303–308. DOI: 10.17513/vaael.1951. EDN IOHGOF.

5. Нотман О.В. Индексный метод оценки качества городской среды: международный и российский опыт // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 1: Регионоведение: философия, история, социология, юриспруденция, политология, культурология. 2021. № 2 (279). С. 89–99. DOI: 10.53598/2410-3691-2021-2-279-89-99. EDN WQFFGI.

6. Пуляева В.Н., Иванова И.А. Создание комфортной городской среды в системе мер по повышению качества жизни населения в регионах // Жилищные стратегии. 2023. Т. 10. № 4. С. 425–440. DOI: 10.18334/zhs.10.4.119238. EDN WXLVXV.

7. Секушина И.А. Качество городской среды крупных городов Вологодской области // Проблемы развития территории. 2022. Т. 26. № 4. С. 111–135. DOI: 10.15838/ptd.2022.4.120.8. EDN MYDCJR.

8. Гресь Р.А. Качество городской среды в Ленинградской области в период 2018–2021 годов // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2023. № 1. С. 50–65. DOI: 10.5922/gikbfu-2023-1-4. EDN DHCLLG.

9. Липилин Д.А., Евтушенко Д.Д. Оценка качества городской среды с применением геоинформационных систем на примере микрорайонов города Краснодара // Геология и геофизика Юга России. 2022. Т. 12. № 3. С. 195–210. DOI: 10.46698/VNC.2022.72.93.013. EDN RWWSRO.

10. Артемова О.В., Савченко А.Н. Качество городской среды: вопросы организации и социализации общественного пространства // Векторы благополучия: экономика и социум. 2021. № 2 (41). С. 73–86. DOI: 10.18799/26584956/2021/2(41)/1076. EDN TPVMIB.

11. Ren Y., Zhou M., Zhu A., Shi S., Zhu H., Chen Y. et al. Evolution, Reconfiguration and low-carbon performance of green space pattern under diverse urban development scenarios: A machine learning-based simulation approach // Ecological Indicators. 2024. Vol. 169. P. 112945. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.112945

12. Yu X., Yang Z., Xu D., Wang Q., Peng J. Urban green spaces enhanced human thermal comfort through

dual pathways of cooling and humidifying // Sustainable Cities and Society. 2025. Vol. 118. P. 106032. DOI: 10.1016/j.scs.2024.106032

13. Shen C., Wang Y., Xu Y., Li X. Unveiling citizen-government interactions in urban renewal in China: Spontaneous online opinions, regional characteristics, and government responsiveness // Cities. 2024. Vol. 148. P. 104857. DOI: 10.1016/j.cities.2024.104857

14. Cao K., Deng Y. The impact and interactive effects of multi-level spatial policies on urban renewal: A case study of Shenzhen, China // Habitat International. 2023. Vol. 142. P. 102952. DOI: 10.1016/j.habitatint.2023.102952

15. Zhao X., Xia N., Li M. Dynamic monitoring of urban renewal based on multi-source remote sensing and POI data: A case study of Shenzhen from 2012 to 2020 // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2023. Vol. 125. P. 103586. DOI: 10.1016/j.jag.2023.103586

16. Liu Y., Chen X., Xiao H., Duan J. Study on the smart transformation strategy of old neighbourhoods based on urban renewal // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Smart Infrastructure and Construction. 2024. Vol. 177. Issue 1. Pp. 15–24. DOI: 10.1680/jsmic.23.00013

17. Pan W., Du J. Towards sustainable urban transition : a critical review of strategies and policies of urban village renewal in Shenzhen, China // Land Use Policy. 2021. Vol. 111. P. 105744. DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105744

18. Wang W.K., Tsai I-C. Discussing the role of urban renewal incentive policies based on housing price effects // Economic Analysis and Policy. 2025. Vol. 85. Pp. 275–291. DOI: 10.1016/j.eap.2024.12.005

19. Liu X. Housing renewal policies, house prices and urban competitiveness // Applied Geography. 2010. Vol. 30. Issue 2. Pp. 221–228. DOI: 10.1016/j.apgeog.2009.04.003

20. Expósito-Sobrino S., Vázquez V.F., Cámara A., Paje S.E. Evaluation of a pavement surface renewal for urban traffic noise abatement // Applied Acoustics. 2023. Vol. 211. P. 109554. DOI: 10.1016/j.apacoust.2023.109554

Поступила в редакцию 20 января 2025 г.

Принята в доработанном виде 12 февраля 2025 г.

Одобрена для публикации 13 февраля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Наталья Григорьевна Верстина** — доктор экономических наук, профессор, заведующая кафедрой менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 287560, Scopus: 6506229832, ORCID: 0000-0003-1152-8129, ResearcherID: B-4162-2016; verstinang@mgsu.ru;

Наталья Николаевна Щепкина — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1017109, Scopus: 57208305879, ORCID: 0000-0002-3250-6212, ResearcherID: ABI-3123-2020; schepkinann@mgsu.ru;

Владимир Сергеевич Цура — аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0009-0009-9865-6756; vladimirtsura@yandex.ru.

Вклад авторов:

Верстина Н.Г. — научное руководство, выбор методологии и научное редактирование материалов.

Щепкина Н.Н. — написание введения, итоговых выводов.

Цура В.С. — идея, сбор и обработка материала, написание текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Zhdanova A.E. Forming a comfortable urban environment : review of the regulatory and legal field. *Economy. Sociology. Law*. 2023; 2(30):9-18. DOI: 10.22281/2542-1697-2023-02-02-09-18. EDN QJORG. (rus.).
2. Chaikovskaya L.V. *Legal regulation of the formation of a comfortable urban environment in the Russian Federation : abstract of a dissertation ... candidate of legal sciences*. Kursk, 2024; 28. (rus.).
3. Belyaeva L.O., Strelets K.I. Assessment of the comfort of the urban environment. *Russian Journal of Construction Science and Technology*. 2023; 9(1):33-47. DOI: 10.15826/rjst.2023.1.004. EDN KVTPUI. (rus.).
4. Polyakova E.Yu., Lyakhova N.I., Novikova O.A. Methodology for assessing the quality and comfort of the urban environment. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2021; 11-2:303-308. DOI: 10.17513/vaael.1951. EDN IOHGOF. (rus.).
5. Notman O.V. Index method for assessing the quality of the urban environment: international and Russian experience. *The Bulletin of the Adyge State University, the series "Region Studies: Philosophy, History, Sociology, Jurisprudence, Political Sciences and Culturology"*. 2021; 2(279):89-99. DOI: 10.53598/2410-3691-2021-2-279-89-99. EDN WQFFGI. (rus.).
6. Pulyaeva V.N., Ivanova I.A. Creating a comfortable urban environment in the system of measures to improve the quality of life in the regions. *Russian Journal of Housing Research*. 2023; 10(4):425-440. DOI: 10.18334/zhs.10.4.119238. EDN WXLVXV. (rus.).
7. Sekushina I.A. The urban environment quality of large cities in the Vologda oblast. *Problems of Territory's Development*. 2022; 26(4):111-135. DOI: 10.15838/ptd.2022.4.120.8. EDN MYDCJR. (rus.).
8. Gres R.A. The urban environment quality in the Leningrad region in 2018–2021. *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Natural and Medical Sciences*. 2023; 1:50-65. DOI: 10.5922/gikbfu-2023-1-4. EDN DHCLLG. (rus.).
9. Lipilin D.A., Evtushenko D.D. Assessment of the urban environment quality using geoinformation systems by the example of microdistricts of the city of Krasnodar. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2022; 12(3):195-210. DOI: 10.46698/VNC.2022.72.93.013. EDN RWWSRO. (rus.).
10. Artemova O.V., Savchenko A.N. Quality of the urban environment: issues of organization and socialization of public space. *Journal of Wellbeing Technologies*. 2021; 2(41):73-86. DOI: 10.18799/26584956/2021/2(41)/1076. EDN TPVMI. (rus.).
11. Ren Y., Zhou M., Zhu A., Shi S., Zhu H., Chen Y. et al. Evolution, Reconfiguration and low-carbon performance of green space pattern under diverse urban development scenarios: A machine learning-based simulation approach. *Ecological Indicators*. 2024; 169:112945. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.112945
12. Yu X., Yang Z., Xu D., Wang Q., Peng J. Urban green spaces enhanced human thermal comfort through dual pathways of cooling and humidifying. *Sustainable Cities and Society*. 2025; 118:106032. DOI: 10.1016/j.scs.2024.106032
13. Shen C., Wang Y., Xu Y., Li X. Unveiling citizen-government interactions in urban renewal in China: Spontaneous online opinions, regional characteristics, and government responsiveness. *Cities*. 2024; 148:104857. DOI: 10.1016/j.cities.2024.104857
14. Cao K., Deng Y. The impact and interactive effects of multi-level spatial policies on urban renewal: A case study of Shenzhen, China. *Habitat International*. 2023; 142:102952. DOI: 10.1016/j.habitatint.2023.102952
15. Zhao X., Xia N., Li M. Dynamic monitoring of urban renewal based on multi-source remote sensing and POI data: A case study of Shenzhen from 2012 to 2020. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2023; 125:103586. DOI: 10.1016/j.jag.2023.103586
16. Liu Y., Chen X., Xiao H., Duan J. Study on the smart transformation strategy of old neighbourhoods based on urban renewal. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Smart Infrastructure and Construction*. 2024; 177(1):15-24. DOI: 10.1680/jsmic.23.00013
17. Pan W., Du J. Towards sustainable urban transition : a critical review of strategies and policies of urban village renewal in Shenzhen, China. *Land Use Policy*. 2021; 111:105744. DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105744
18. Wang W.K., Tsai I-C. Discussing the role of urban renewal incentive policies based on housing

price effects. *Economic Analysis and Policy*. 2025; 85:275-291. DOI: 10.1016/j.eap.2024.12.005

19. Liu X. Housing renewal policies, house prices and urban competitiveness. *Applied Geography*. 2010; 30(2):221-228. DOI: 10.1016/j.apgeog.2009.04.003

20. Expósito-Sobrino S., Vázquez V.F., Cámara A., Paje S.E. Evaluation of a pavement surface renewal for urban traffic noise abatement. *Applied Acoustics*. 2023; 211:109554. DOI: 10.1016/j.apacoust.2023.109554

Received January 20, 2025.

Adopted in revised form on February 12, 2025.

Approved for publication on February 13, 2025.

B I O N O T E S: **Natalia G. Verstina** — Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of the Department of Management and Innovations; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 287560, Scopus: 6506229832, ORCID: 0000-0003-1152-8129, ResearcherID: B-4162-2016; verstinang@mgsu.ru;

Natalia N. Shchepkina — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1017109, Scopus: 57208305879, ORCID: 0000-0002-3250-6212, Researcher ID: ABI-3123-2020; schepkinann@mgsu.ru;

Vladimir S. Tsura — postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-9865-6756; vladimirtsura@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Natalia G. Verstina — scientific guidance, methodology selection and scientific editing of materials.

Natalia N. Shchepkina — writing the introduction and final conclusions.

Vladimir S. Tsura — the idea, collection and processing of the material, writing the text of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом **IMRaD** и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), 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.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских 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:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество 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 аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке источников сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в

статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Вклад авторов: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

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.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bi o n o t e s: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

Contribution of the authors: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д. / conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, supervision etc.) на английском языке.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 637,00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 3 822 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 637,00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

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/>



УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

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/>

