

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 21. Выпуск 4
2026**

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

Сквозной номер 209

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 21. Issue 4
2026**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 24-76
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	29.04.2026.
Подписан в свет	30.04.2026.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 24,18. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 126

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

строительный факультет, Республика Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: Алла Русланбековна Табекова

Редактор: Татьяна Владимировна Бердникова

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Дизайн и верстка: Алина Юрьевна Байкова

Перевод на английский язык: Ольга Валерьевна Юденкова

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	30.04.2026

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszkuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Executive editor: *Alla R. Tabekova*

Corrector: *Oksana V. Ermikhina*

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova*

Layout: *Alina Y. Baykova*

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

В.В. Прокопенко
Формирование модели водно-зеленого каркаса для линейной градостроительной системы 481

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

И.А. Антаков, А.Б. Антаков, А.Р. Гиздатуллин
Расчет плит перекрытий монолитных каркасов с комбинированным армированием на эксплуатационные нагрузки и устойчивость к прогрессирующему обрушению 495

И.В. Демьянушко, В.М. Стаин, И.А. Карпов, П.М. Абраменков
Конечно-элементные модели термогидромеханического расчета насыпей автомобильных дорог в районах многолетнемерзлых грунтов 512

Т.А. Мацевич, С.А. Данков
Вероятностное моделирование стальной ферменной конструкции с учетом коррозионной деградации стержневых элементов 528

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А.А. Леденев, В.Т. Перцев
Развитие методологии исследований, направленной на управление структурообразованием цементных композитов 541

А.С. Бахтин, Н.В. Любомирский, Т.А. Бахтина, Г.Р. Биленко, И.А. Тюнюков
Бесцементные вяжущие системы на основе отходов производства глинозема, твердеющие за счет принудительной карбонизации 560

С.Р. Сокольникова, А.С. Иноземцев
Стабилизация термоаккумулирующего материала углеродным носителем в составе высокопрочного легкого бетона 577

О.А. Ларсен, И.О. Раббаа
Совместимость модификаторов вязкости и гидрофобизаторов при обеспечении адгезии бетона для 3D-печати . . 592

Е.И. Фролов, Р.В. Демидов
Использование боя керамогранитной плитки в качестве замены заполнителей в тяжелых бетонах 604

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.Л. Торопов
Энергетическая эффективность теплоснабжения индивидуальных домов с гибридной системой тепловой генерации 615

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Н.Н. Чернобровкин, Д.В. Козлов
Межотраслевая оценка Волжско-Камского каскада гидроузлов на действующих и проектных отметках 628

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.Р. Супрун, Н.Н. Таскаева
Методический подход к оценке готовности строительной организации к трансформации корпоративной культуры 641

Е.В. Кац, А.В. Суворова
Автоматизация формирования исполнительной документации на основе цифровой информационной модели . . 652

Требования к оформлению научной статьи 667

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Vyacheslav V. Prokopenko

Formation of a water-green framework model for a linear urban planning system. 481

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

Igor A. Antakov, Alexey B. Antakov, Anton R. Gizdatullin

Design of floor slabs in monolithic frames with composite reinforcement for service loads and resistance to progressive collapse 495

Irina V. Demiyanyushko, Valery M. Stain, Ilya A. Karpov, Pavel M. Abramnikov

Finite element models for the thermohydrromechanical analysis of road embankments in areas with permafrost soils 512

Tatyana A. Matseevich, Saveliy A. Dankov

Probabilistic modelling of a steel truss structure taking into account the corrosion degradation of the rod elements 528

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Andrey A. Ledenev, Victor T. Pertsev

Development of a research methodology aimed at controlling the formation of the microstructure of cement composites. 541

Aleksandr S. Bakhtin, Nikolay V. Lyubomirskiy, Tamara A. Bakhtina, German R. Bilenko, Ivan A. Tyunyukov

Cement-free binder systems based on alumina production waste hardened by forced carbonation 560

Sofia R. Sokolnikova, Aleksandr S. Inozemtcev

Stabilization of heat-storage material using a carbon carrier in high-strength lightweight concrete 577

Oksana A. Larsen, Ilya O. Rabbaa

Compatibility of viscosity modifiers and hydrophobic agents in ensuring concrete adhesion for 3D printing 592

Evgeny I. Frolov, Roman V. Demidov

The use of crushed porcelain stoneware tiles as a substitute for aggregates in heavy concrete. 604

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Alexey L. Toropov

Energy efficiency of heating supply in detached houses with a hybrid heat generation system 615

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Nikita N. Chernobrovkin, Dmitry V. Kozlov

Intersectoral assessment of the Volga-Kama cascade of hydropower plants operating at existing and design water levels 628

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Alexander R. Suprun, Natalia N. Taskaeva

Methodical approach to assessing the readiness of a construction organization to transform corporate culture 641

Elena V. Kats, Alina V. Suvorova

Automation of as-built documentation generation based on a digital information model 652

Requirements for research paper design 667

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).

Формирование модели водно-зеленого каркаса
для линейной градостроительной системы

Вячеслав Валентинович Прокопенко

Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ); г. Волгоград, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Линейные градостроительные системы (ГС) из-за своей пространственной организации требуют особого подхода к формированию водно-зеленого каркаса (ВЗК), который играет ключевую роль в обеспечении их экологической устойчивости, улучшении микроклимата и качества среды. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки модели, позволяющей не только описывать, но и количественно оценивать и прогнозировать устойчивость структуры ВЗК. Научная новизна работы заключается в разработке методологии, интегрирующей теоретическое моделирование, математическую формализацию и оценку устойчивости, а также в апробации предложенной модели на примере Волгограда с расчетом интегрального показателя устойчивости водно-зеленого каркаса.

Материалы и методы. Исследование базируется на синтезе системного, комплексного и программно-целевого подходов. Методология включает три этапа: аналитический (пространственное зонирование, идентификация элементов ВЗК, комплексная оценка с использованием ГИС-анализа; концептуальное моделирование (разработка идеализированной модели ВЗК)); математическое моделирование и оценка. Для оценки устойчивости узлов применялся метод главных компонент, для определения весовых коэффициентов в интегральной модели — метод анализа иерархий.

Результаты. Предложена теоретическая модель структуры ВЗК для линейной ГС. Разработана и апробирована на примере Волгограда комплексная методология формирования и оценки модели ВЗК. Разработан интегральный показатель устойчивости $Y_{ВЗК}$, агрегирующий нормализованные индексы продольных поясов (J_n), поперечных коридоров (J_k) и узлов (J_y). Определены весовые коэффициенты вклада каждого элемента структуры ВЗК в ее устойчивость.

Выводы. Практическая значимость работы состоит в предложении инструментария для количественной оценки и стратегического планирования развития ВЗК линейных ГС. Предложенная методология позволяет не только констатировать проблемы, но и выявлять их структурные причины, определяя приоритетность воздействия на системообразующие (продольные пояса) и связующие (поперечные коридоры) элементы. Результаты исследования могут быть применены в градостроительном проектировании и территориальном планировании для линейных градостроительных систем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водно-зеленый каркас, линейная градостроительная система, устойчивость, математическое моделирование, градостроительное планирование, интегральный показатель, метод анализа иерархий

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Прокопенко В.В. Формирование модели водно-зеленого каркаса для линейной градостроительной системы // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 4. С. 481–494. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.481-494

Автор, ответственный за переписку: Вячеслав Валентинович Прокопенко, v.v.p_24@mail.ru.

Formation of a water-green framework model
for a linear urban planning system

Vyacheslav V. Prokopenko

Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Linear urban planning systems have a specific spatial organization that imposes special requirements for the formation of a water-green framework (WGF). The WGF is a key element in ensuring their ecological sustainability, improving the microclimate, and enhancing the quality of the environment. The relevance of the study is due to the need to develop a methodology that allows not only to describe but also to quantitatively assess and predict the sustainability of the WGF structure. The scientific novelty of the work lies in the development of a three-stage methodology integrating theoretical modelling, mathematical formalization, and sustainability assessment, as well as in the testing of this methodology on the example of Volgograd with the calculation of an integral sustainability indicator.

Materials and methods. The research is based on a synthesis of systemic, comprehensive, and program-targeted approaches. The methodology includes three stages: analytical (spatial zoning, identification of WGF elements, comprehensive assessment using GIS analysis); conceptual modelling (development of an idealized WGF model)); mathematical modelling and assessment. The principal component method was used to assess the sustainability of nodes, and the analytic hierarchy process was used to determine the weight coefficients in the integral model.

Results. A theoretical model of the water-green framework structure for a linear urban planning system is proposed. A comprehensive methodology for the formation and assessment of the WGF model was developed and tested on the example of Volgograd. An integral sustainability indicator, U_{WGF} , aggregating the normalized indices of longitudinal belts (J_b), transverse corridors (J_c), and nodes (J_n), is proposed. The weight coefficients of the contribution of each structural element of the WGF to its sustainability are determined.

Conclusions. The practical significance of the work lies in the proposal of a toolkit for the quantitative assessment and strategic planning of the development of the WGF for linear urban planning systems. The proposed methodology allows not only to state problems but also to identify their structural causes, determining the priority of impact on the system-forming (longitudinal belts) and connecting (transverse corridors) elements. The research results can be applied in urban planning and territorial planning for linear urban planning systems, in particular, in the regions of the Volga region, the Urals, and Siberia.

KEYWORDS: water-green framework, linear urban planning system, sustainability, mathematical modelling, urban planning, integral indicator, analytic hierarchy process

FOR CITATION: Prokopenko V.V. Formation of a water-green framework model for a linear urban planning system. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(4):481-494. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.481-494 (rus.).

Corresponding author: Vyacheslav V. Prokopenko, v.v.p_24@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Современные вызовы урбанизации, связанные с обострением экологических проблем, требуют разработки эффективных инструментов устойчивого развития градостроительных систем. Особую актуальность это направление приобретает для городов с линейной градостроительной структурой, где пространственная организация предопределяет специфические требования к формированию и функционированию градостроительной системы [1, 2]. Водно-зеленый каркас (ВЗК), интегрирующий природные и антропогенные территории, выступает ключевым элементом в обеспечении экологической стабильности, улучшении микроклимата и повышении качества жизни населения в таких системах [3, 4].

Анализ подходов к стратегическому градостроительному планированию [5] свидетельствует о необходимости разработки комплексных методик, учитывающих коэволюцию техносферных и биосферных систем. При этом подчеркивается целесообразность рассмотрения природного комплекса как активного компонента, находящегося в динамическом взаимодействии с искусственной средой, что особенно значимо для линейных градостроительных систем, где данная взаимосвязь проявляется наиболее интенсивно.

Несмотря на большое количество исследований, посвященных зеленой инфраструктуре и природному каркасу [6–8], вопросы комплексного моделирования и количественной оценки устойчивости ВЗК именно для линейных градостроительных систем (ГС) остаются недостаточно разработанными. Существующие подходы зачастую носят описательный характер или фокусируются на отдельных компонентах, не учитывая системных взаимосвязей и иерархического построения структуры каркаса [9, 10]. Эмпирические исследования, рассматривающие формирование ВЗК в условиях исторически сложившегося культурного ландшафта [11], позволяют выявить типичные закономерности его деградации. К числу последних относятся утилитарный подход к использованию ключевых территорий, приводящий к их трансформации, фрагментация каркаса и наличие множественных антропогенных

барьеров. Полученные выводы имеют важное методологическое значение для разработки модели ВЗК линейных систем, поскольку акцентируют необходимость учета историко-генетических факторов для минимизации типичных планировочных ошибок.

Важный вклад в развитие концепции зеленой инфраструктуры как стратегического подхода к планированию внесли авторы работы [12]. Они определяют зеленую инфраструктуру как сеть природных и полуприродных территорий, которая обеспечивает широкий спектр экосистемных услуг и соединяет города с их окружением. Также авторы подчеркивают, что зеленая инфраструктура представляет собой парадигматический сдвиг в планировании, преодолевая фрагментированное мышление за счет интеграции различных дисциплин, таких как городское лесное хозяйство, сельское хозяйство и ландшафтная экология. Анализ исследований демонстрирует, что многофункциональность [13], связность [14] и учет социально-экономических аспектов являются ключевыми характеристиками успешных проектов зеленой инфраструктуры. Этот подход акцентирует целостное видение, при котором город рассматривается как часть более широкой природной системы, а не изолированное образование¹ [15]. В то же время недостаточно изучены методы интегральной оценки, агрегирующей разнородные параметры элементов ВЗК в единый показатель, а также инструменты анализа пространственной связности, определяющей целостность и устойчивость каркаса к внешним воздействиям [16, 17].

Цель настоящего исследования — разработка комплексной методологии формирования и оценки модели водно-зеленого каркаса для линейных градостроительных систем, позволяющей проводить количественную оценку его устойчивости.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- сформулировать теоретические основы и принципы моделирования ВЗК;

¹ Landscape Institute. Green Infrastructure: An integrated approach to land use. London : Landscape Institute, 2013. 17 p. URL: <http://www.landscapeinstitute.org/PDF/Contribute/2013GreenInfrastructureLIPositionStatement.pdf>

- разработать трехэтапный алгоритм построения модели;
- предложить систему интегральных показателей для оценки устойчивости и связности структур;
- апробировать методологию на примере линейной ГС Волгограда.

Научная новизна исследования заключается в разработке трехэтапной методологии, интегрирующей теоретическое моделирование, математическую формализацию и оценку устойчивости ВЗК, а также в апробации предложенной методологии на примере Волгограда с расчетом интегрального показателя устойчивости, агрегирующего нормализованные индексы продольных поясов, поперечных коридоров и узловых элементов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования рассматривалась линейная градостроительная система Волгограда, в качестве предмета — ее водно-зеленый каркас. Методологическую основу исследования составил синтез теоретических и эмпирических методов, объединенных в комплексную трехэтапную методологию формирования и оценки модели ВЗК для линейных ГС. Общая схема методологии представлена на рис. 1.

Выбор Волгограда объектом исследования обусловлен его классической линейной структурой: город протянулся более чем на 90 км вдоль р. Волги, что создает уникальные условия для изучения специфики формирования ВЗК в подобных ГС.

Исследование основывается на применении системы взаимодополняющих научных подходов:

1. Системный подход позволил рассмотреть ВЗК как целостную иерархическую структуру, где свойства системы не сводятся к сумме свойств ее элементов (продольных поясов, поперечных коридоров, узлов), а определяются связями между ними.

2. Комплексный подход дал возможность осуществить одновременный учет градостроительных, экологических, социальных и функциональных аспектов при формировании модели.

3. Программно-целевой подход позволил сфокусировать исследование на достижении целевого показателя — устойчивости структуры ВЗК, что определило последовательность и содержание этапов.

4. Моделирование базировалось на следующих принципах: принципе генезиса (учет исторических трансформаций); принципе системного соответствия (взаимодействие элементов на всех уровнях территориального планирования); принципе пространственной непрерывности (обеспечение связности ядер и коридоров); принципе аддитивности (поэтапное формирование структуры от элемента к системе).

Методологическая основа исследования также включает элементы пространственного плани-

рования на разных иерархических уровнях, что позволяет учитывать не только урбанистические, но и природные аспекты формирования ВЗК. Интеграция этих подходов обеспечивает комплексность исследования и возможность учета разнородных факторов, влияющих на устойчивость каркасной структуры.

Этапы исследования и применяемые методы

Этап 1. Аналитический. На этом этапе решались задачи по сбору, систематизации и комплексной оценке исходных данных о состоянии территории. В качестве исходных сведений применялись: градостроительная документация (генеральный план, правила землепользования и застройки), информация дистанционного зондирования Земли (космические снимки), материалы натурных обследований, данные государственного статистического наблюдения, нормативно-правовые акты.

Достоверность результатов обеспечивалась использованием разнообразных источников информации: архивные материалы по истории градостроительного развития Волгограда, данные полевых обследований состояния зеленых насаждений, результаты лабораторных исследований качества окружающей среды. Особое внимание уделялось согласованию сведений из различных источников и их привязке к единой системе координат для обеспечения корректности пространственного анализа.

Методы:

- пространственное зонирование. Территория линейной ГС (на примере Волгограда) была разделена на систему параллельных поясов, ориентированных вдоль градостроительной оси (р. Волга). Выделено шесть продольных поясов: прибрежный, центральный, транспортный, срединный, периферийный и буферный. Критериями выделения продольных поясов служили: удаленность от р. Волги, функциональное зонирование территории, интенсивность транспортных потоков, характер застройки и экологические характеристики. Каждый пояс обладает специфическими особенностями, определяющими его роль в общей структуре ВЗК и требования к его развитию;

- ГИС-анализ. В среде геоинформационных систем (ArcGIS, QGIS) была создана цифровая картографическая основа. Произведена векторизация элементов ВЗК (парки, скверы, лесопарки, набережные, овражно-балочная сеть, водные объекты) с формированием атрибутивных баз данных (площадь, тип объекта, степень озелененности и др.). ГИС-анализ включал пространственный анализ распределения элементов ВЗК, расчет буферных зон влияния, оценку связности элементов каркаса с использованием методов сетевого анализа. Для оценки озелененности территорий применялись вегетационные индексы (NDVI), рассчитанные на основе мультиспектральных космических снимков. Использование вегета-

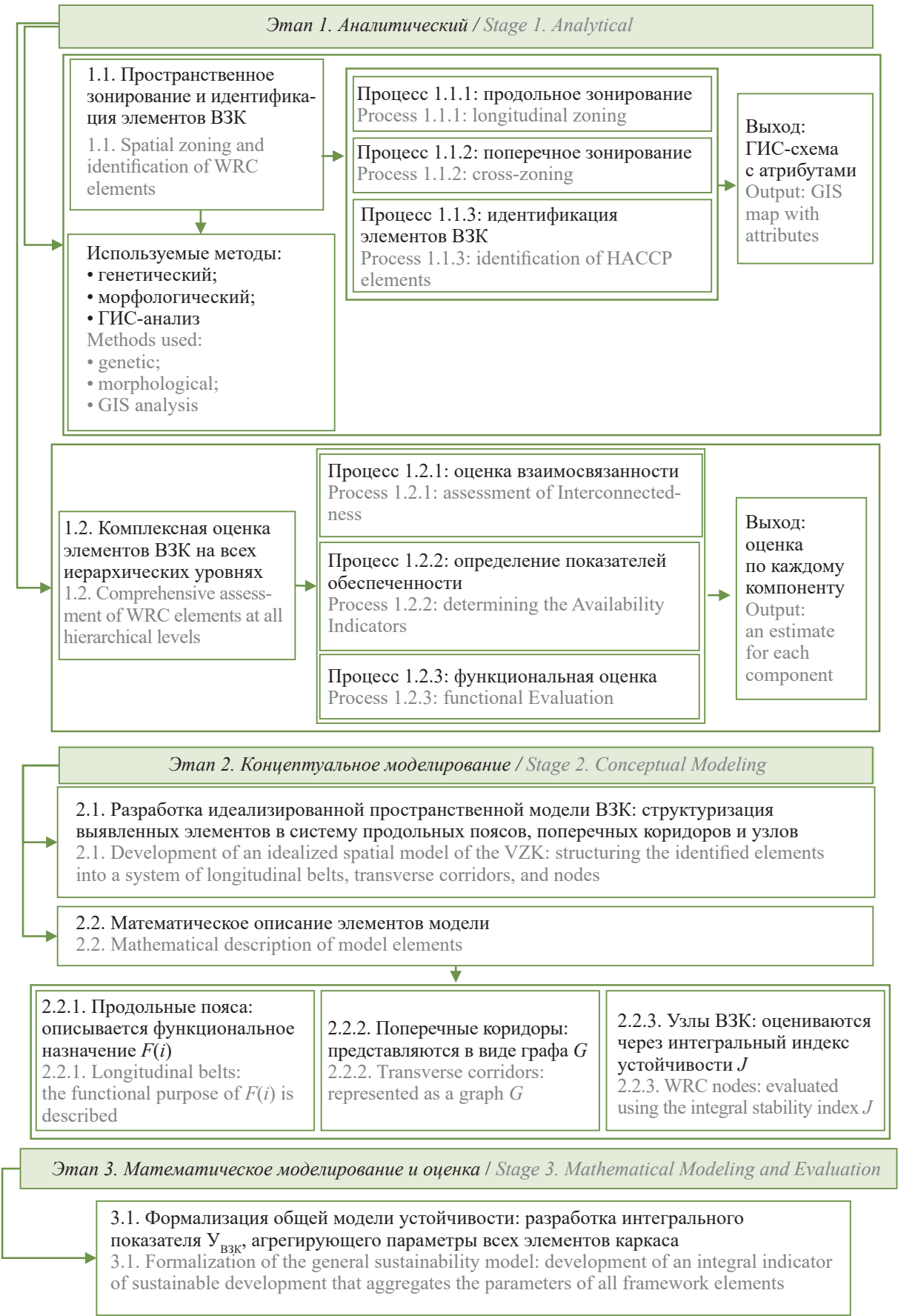


Рис. 1. Общая схема методологии формирования и оценки модели ВЗК

Fig. 1. General scheme of the methodology for forming and evaluating the WGF model

ционных индексов позволило получить объективные количественные данные о состоянии растительного покрова;

- генетический метод. Применен для анализа исторического формирования структуры ВЗК, выявления трансформаций ландшафта и определения современного состояния элементов каркаса (например, анализ эволюции овражно-балочной системы и «Зеленого кольца» Волгограда). Генетический анализ включал изучение исторических картографических материалов, архивных документов и научных публикаций [18–20], что позволило проследить этапы формирования градостроительной структуры Волгограда и выявить причины современных проблем ВЗК. Особое внимание уделялось анализу послевоенного восстановления города и его влияния на формирование зеленого каркаса;
- морфологический анализ. Использован для классификации элементов ВЗК по их пространственным характеристикам (конфигурация, размер, взаимное расположение) и функциональному назначению. В рамках морфологического анализа разработана типология элементов ВЗК по следующим критериям: размеру (крупные, средние, малые), конфигурации (линейные, площадные, точечные), функциональному назначению (рекреационные, средозащитные, природоохранные). Это позволило систематизировать разнородные элементы каркаса

и выявить закономерности их пространственного распределения;

- комплексная оценка. На основе собранных данных проведены оценка обеспеченности озелененными территориями по поясам, анализ функциональной эффективности и выявление конфликтных зон (например, размещение промышленных предприятий в прибрежном поясе). Комплексная оценка включала расчет показателей обеспеченности озелененными территориями на душу населения по районам города, анализ соответствия фактических параметров ВЗК нормативным требованиям, выявление зон экологического напряжения и территорий с нарушенными экологическими функциями. Для оценки функциональной эффективности использовались методы экспертных оценок и сравнительного анализа.

Этап 2. Концептуальное моделирование. Цель этапа — преобразование выявленных и оцененных элементов в идеализированную пространственную модель ВЗК (рис. 2).

Методы:

Структуризация. Все элементы ВЗК были систематизированы в три ключевых компонента модели:

1. Продольные пояса. Описываются через интегральную оценку их функционального назначения (формула (1)), которая учитывает долю различных

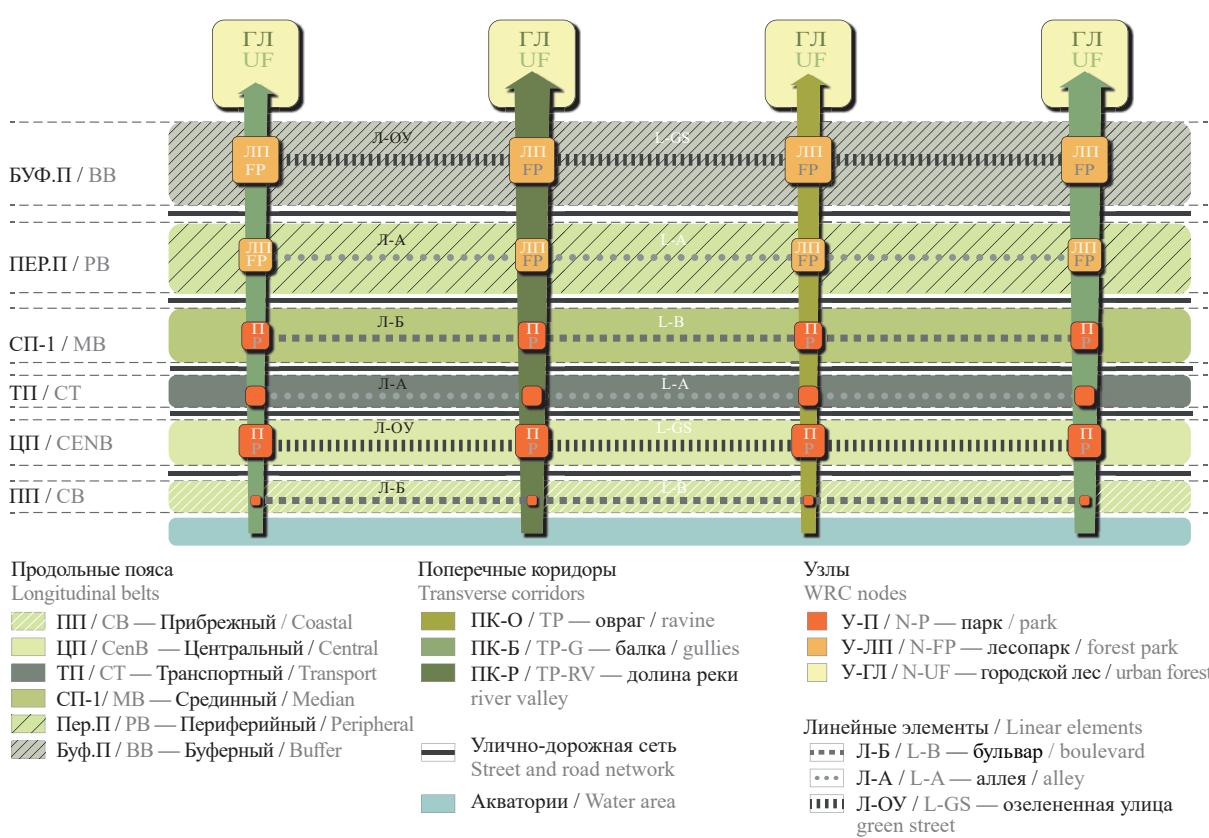


Рис. 2. Идеализированная модель структуры ВЗК линейной ГС

Fig. 2. Idealized model of the linear UPS WGF structure

типов озелененных территорий (общего, ограниченного пользования, специального назначения) с весовыми коэффициентами, определенными методом экспертных оценок:

$$F(i) = a_1 \frac{S_1}{S_{\text{пояса}}} + a_2 \frac{S_2}{S_{\text{пояса}}} + a_3 \frac{S_3}{S_{\text{пояса}}}, \quad (1)$$

где S_1, S_2, S_3 — площади озелененных территорий общего, ограниченного пользования и специального назначения в пределах пояса; $S_{\text{пояса}}$ — общая площадь пояса; a_1, a_2, a_3 — весовые коэффициенты.

Определение весовых коэффициентов проводилось методом экспертных оценок с привлечением специалистов в области градостроительства, экологии и архитектуры. Процедура экспертной оценки включала анкетирование 10 экспертов с последующим согласованием мнений методом Дельфи, что позволило достигнуть консенсуса по значимости различных категорий территорий для формирования ВЗК.

2. Поперечные коридоры. Формализованы в виде неориентированного графа:

$$G = (V, E), \quad (2)$$

где V — множество вершин (узлы пересечения коридоров с поясами, ключевые парки); E — множество ребер (участки оврагов, балок, долин малых рек, линейных озелененных территорий). Каждому ребру присваиваются атрибуты: длина, ширина, показатель озелененности.

Для оценки эффективности поперечных коридоров использовались показатели связности графа, включая индекс связанности, индекс линейной связности и другие топологические характеристики. Это позволило количественно оценить уровень интеграции различных элементов каркаса и выявить критические разрывы в системе экологических коридоров.

3. Узлы ВЗК. Крупные озелененные территории (парки, лесопарки), идентифицированные в местах пересечения продольных и поперечных элементов. Для них разработан алгоритм оценки индекса устойчивости J .

Идентификация узлов ВЗК осуществлялась на основе анализа их пространственного положения, размера и функциональной значимости. К узлам первого порядка отнесены наиболее крупные и ценные территории, играющие ключевую роль в обеспечении экологической стабильности города. Для каждого узла определялся радиус влияния и зона обслуживания населения.

Этап 3. Математическое моделирование и оценка. Цель этапа — количественная оценка устойчивости структуры ВЗК.

Методы:

Оценка устойчивости узлов (индекс J). Для перехода от множества разноплановых показателей

(площадь, плотность озеленения, породный состав, рекреационная нагрузка, шумовой фон, концентрация загрязняющих веществ и др.) к интегральной оценке применен факторный анализ, а именно метод главных компонент (МГК). Процедура включала:

- стандартизацию исходных показателей;
- построение матрицы интеркорреляций и проверку ее пригодности для факторного анализа;
- выделение латентных факторов (главных компонент), объясняющих большую часть дисперсии данных (критерий Кайзера и критерий «каменистой осыпи»). В результате для Волгограда было выделено два фактора, объясняющих 89,2 % общей дисперсии: «Планировочный потенциал» и «Антропогенная нагрузка»;

- расчет факторных весов для каждого объекта.

Проверка пригодности данных для факторного анализа включала расчет критерия Кайзера – Мейера – Олкина ($KMO = 0,78$) и теста сферичности Бартлетта ($p < 0,001$), что подтвердило возможность применения МГК. Выделение главных компонент проводилось с использованием метода варимакс-вращения для улучшения интерпретируемости факторов.

Определение индекса устойчивости $J(f)$ как среднего значения отношений факторов к их пороговым уровням:

$$J(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^2 \frac{f_i}{pf_i}, \quad (3)$$

где f_i — значение i -го фактора; pf_i — его пороговое значение.

Пороговые значения факторов определялись на основе нормативных требований, научно обоснованных критериев и анализа статистических данных. Для факторов, не имеющих нормативных аналогов, пороговые значения устанавливались методом квартильного анализа с использованием значений верхних квартилей как ориентиров для достижения [18].

Расчет компонентных индексов:

- индекс продольных поясов $J_{\text{п}}$ рассчитан как среднее арифметическое интегральных оценок $F(i)$ всех поясов;
- индекс поперечных коридоров $J_{\text{к}}$ рассчитан как средневзвешенная озелененность всех коридоров, где весами выступают их площади;
- индекс узлов $J_{\text{у}}$ рассчитан как среднее арифметическое индексов устойчивости J всех ключевых узлов.

Для обеспечения сопоставимости компонентных индексов проведена их нормализация к безразмерному виду с приведением к диапазону от 0 до 1. Это позволило корректно агрегировать разнородные показатели в интегральный индекс устойчивости и обеспечить сравнимость результатов для различных градостроительных систем.

Определение интегрального показателя устойчивости ВЗК ($Y_{\text{ВЗК}}$). Для агрегации компонентных индексов в единый показатель использован метод

анализа иерархий (МАИ) Т. Саати. Процедура включала [21]:

- построение иерархической структуры (цель – критерии – альтернативы);
- попарное сравнение элементов (продольные пояса, поперечные коридоры, узлы) экспертами по 9-балльной шкале относительно критерия «Вклад в общую устойчивость ВЗК»;
- формирование матрицы парных сравнений и расчет вектора приоритетов (весовых коэффициентов a, b, c) методом среднего геометрического;
- проверку согласованности экспертных суждений через расчет индекса согласованности (ИС) и отношения согласованности (ОС). Полученное значение $ОС < 0,1$ подтвердило приемлемую согласованность.

Интегральный показатель рассчитан по формуле:

$$Y_{ВЗК} = a \cdot J_{\Pi} + b \cdot J_{К} + c \cdot J_{У}, \quad (4)$$

где J_{Π} — индекс продольных поясов; $J_{К}$ — индекс поперечных коридоров; $J_{У}$ — индекс узлов; a, b, c — весовые коэффициенты.

Чувствительность интегрального показателя проверялась методом вариации весовых коэффициентов в пределах $\pm 10\%$. Анализ показал, что полученные результаты устойчивы к незначительным изменениям весов, что подтверждает надежность предложенной методики оценки.

Апробация методологии осуществлена на примере линейной градостроительной системы Волгограда. Обработка данных выполнялась с использованием программного обеспечения: ArcGIS для пространственного анализа, STATISTICA 13.0 для реализации факторного анализа и метода главных компонент, а также специализированных расчетных модулей для реализации метода анализа иерархий.

Для верификации результатов применялись методы кросс-валидации и сравнения с альтернативными методами оценки. Проведенный анализ подтвердил адекватность предложенной методологии и ее применимость для оценки устойчивости ВЗК линейных ГС.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанная теоретическая модель применена для концептуализации ВЗК Волгограда. В результате было выделено шесть продольных поясов, сеть поперечных коридоров на основе овражно-балочной системы и долин малых рек, а также система узловых элементов. Выделенные продольные пояса рассматриваются не только как пространственные зоны, но и как функциональные модули, каждый из которых должен выполнять специфическую средообразующую и рекреационную роль в общей системе каркаса. Сеть поперечных коридоров, основанная на восстановлении и интеграции деградированных овражно-балочных систем и долин малых рек, концептуализирована как ключевой элемент, обеспечи-

вающий поперечную экологическую связность линейной структуры ГС. Узловые элементы, к которым отнесены крупные парки, лесопарки и природные территории, позиционированы как стабилизирующие ядра, повышающие локальную устойчивость и выполняющие функции центров рекреационного притяжения.

Пространственная модель определяет иерархические взаимоотношения между элементами каркаса: продольные пояса формируют основу структурного остова, поперечные коридоры обеспечивают поперечные связи и интеграцию различных частей города, а узлы выступают в качестве точек концентрации экологических и рекреационных функций. Такая организация позволяет эффективно распределять экологические нагрузки и обеспечивать устойчивость системы в целом. Каждый элемент модели обладает специфическими характеристиками: для продольных поясов ключевыми параметрами являются ширина, степень озеленения и функциональное разнообразие; для поперечных коридоров критическое значение имеют непрерывность и экологическая ценность; для узловых элементов определяющими служат площадь, биоразнообразие и рекреационная емкость.

Функциональное зонирование в рамках модели предусматривает специализацию различных элементов ВЗК. Прибрежный пояс ориентирован на рекреационно-экологические функции, центральный и транспортный пояса выполняют средозащитные и рекреационные задачи, а буферный пояс обеспечивает связь с пригородными территориями. Поперечные коридоры в зависимости от их характеристик могут осуществлять функции экологических миграционных путей, рекреационных маршрутов или климатических коридоров. Узловые элементы дифференцируются по их роли в общей системе — от локальных рекреационных объектов до крупных экологических стабилизаторов городской среды.

Концептуальная модель демонстрирует потенциал пространственной организации Волгограда для формирования полноценного ВЗК, где природные и антропогенные элементы синергетично взаимодействуют. Определяя иерархические взаимоотношения между элементами каркаса, концептуальная модель служит основой для перехода от хаотичного освоения территории к целенаправленному формированию каркаса как единого организма, способного адаптироваться к изменениям и обеспечивать долгосрочную экологическую стабильность.

Оценка текущего состояния и выявление структурных проблем ВЗК Волгограда

Однако эмпирическая проверка выявила значительное расхождение между теоретической моделью и реальным состоянием каркаса. Пространственный анализ в рамках аналитического этапа



Рис. 3. Итоги оценки текущего состояния ВЗК Волгограда

Fig. 3. Results of the assessment of the current state of the Volgograd WGF

позволил идентифицировать и локализовать ключевые структурные разрывы и дисфункции.

Наиболее критичными из них оказались (рис. 3):

- 1) фрагментация прибрежного пояса промышленными объектами, нарушающая связь города с главным водным ресурсом;
- 2) деградация овражно-балочной системы, лишающая каркас естественных поперечных связей;
- 3) резкая диспропорция в распределении озелененных территорий общего пользования между различными продольными поясами.

Эти проблемы носят системный характер и не могут быть решены точечными мероприятиями.

Анализ пространственного распределения элементов ВЗК выявил значительные территориальные диспропорции. Наибольшая концентрация озелененных территорий общего пользования отмечается в центральном районе города, тогда как периферийные зоны характеризуются их острым дефицитом. Существующая сеть поперечных связей фрагментирована и не обеспечивает необходимой экологической связности между различными частями города. Особую проблему представляет деградация исторически сложившейся овражно-балочной системы, которая в естественном состоянии могла бы выполнять функции эффективных экологических коридоров.

Сравнительный анализ идеализированной модели и реального состояния ВЗК позволил определить ключевые направления для градостроительных изменений. Приоритетными задачами являются:

- восстановление непрерывности прибрежного пояса через редевелопмент промышленных территорий;
- реабилитация овражно-балочной системы и создание на ее основе сети экологических коридоров;

- выравнивание диспропорций в обеспеченности озелененными территориями за счет создания новых парков и скверов в периферийных районах;

- обеспечение функционального разнообразия элементов каркаса и их интеграции в единую систему.

Таким образом, концептуальное моделирование не только описывает идеальную структуру ВЗК, но и через сравнение с реальностью выявляет направления для стратегических градостроительных изменений. Оно служит связующим звеном между теоретическим пониманием структуры ВЗК и практическими задачами его реабилитации и развития, подчеркивая необходимость комплексного подхода, направленного на восстановление как системообразующих (продольных), так и связующих (поперечных) элементов.

Применение концептуальной модели ВЗК для линейной градостроительной системы Волгограда

На основе выявленных структурных проблем и дисфункций разработана идеализированная концептуальная модель ВЗК, призванная устранить существующие разрывы и обеспечить целостность каркаса. Концептуальная модель основана на положении, что устойчивость ВЗК линейной ГС определяется сбалансированным развитием трех ключевых компонентов: продольных поясов; поперечных коридоров, обеспечивающих поперечную связность и интеграцию с природным окружением; и узлов, выступающих центрами биоразнообразия и рекреационной активности. Идеализированная модель предполагает пространственную непрерывность каждого из этих элементов и их тесное функциональное взаимодействие (рис. 4).

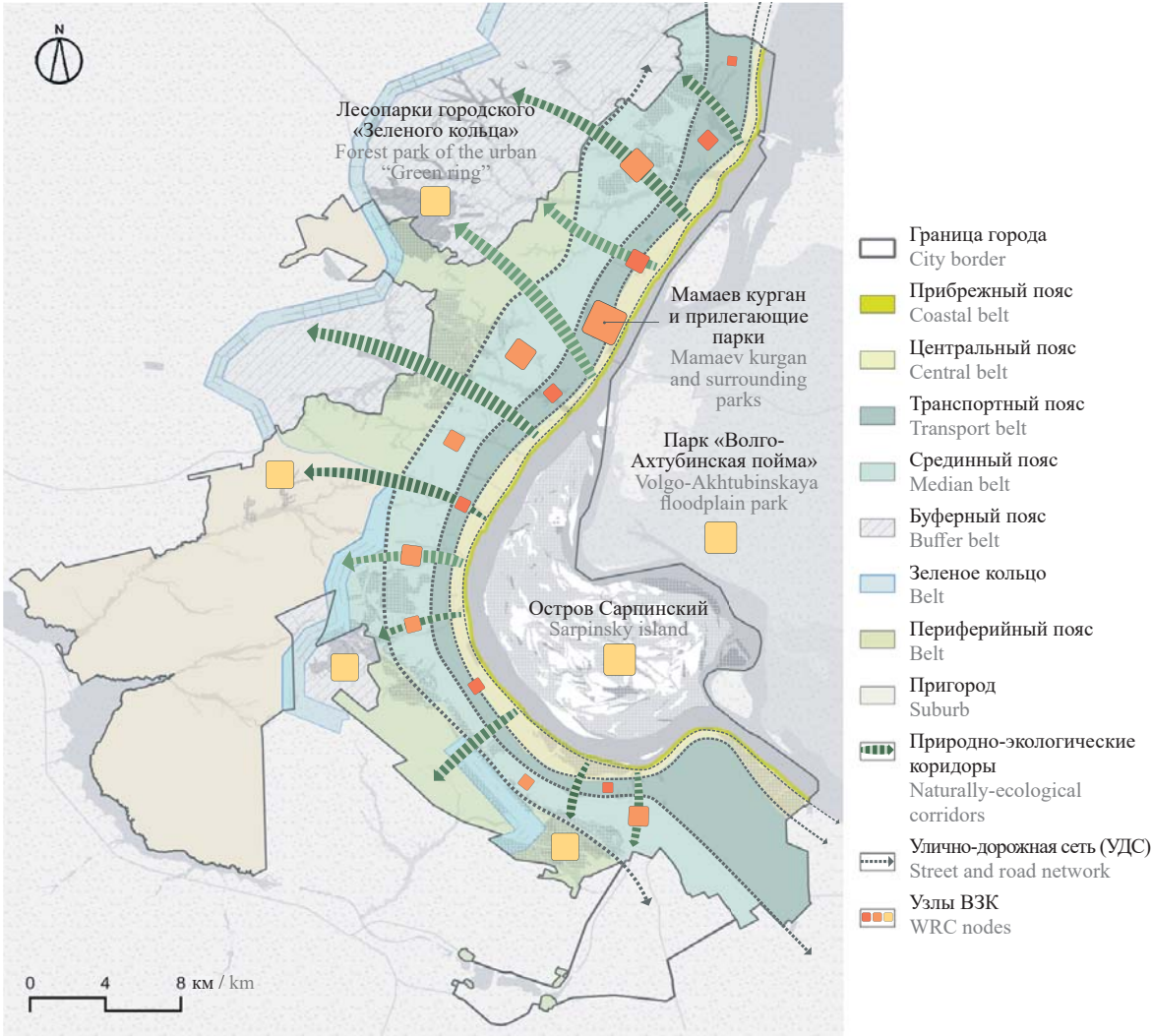


Рис. 4. Идеализированная (теоретическая) функционально-пространственная модель структуры водно-зеленого каркаса Волгограда

Fig. 4. Idealized (theoretical) functional-spatial model of the structure of the water-green frame of Volgograd

Количественная оценка устойчивости структуры ВЗК. Ключевым результатом стала количественная оценка устойчивости с помощью разработанного инструментария.

Оценка устойчивости узлов. С помощью МГК для 18 репрезентативных объектов были выделены два основных фактора, объясняющих 89,2 % дисперсии: «Планировочный потенциал» (66,1 %) и «Антропогенная нагрузка» (23,1 %). Расчет индекса устойчивости J показал значительную поляризацию: от критически низких значений для скверов в центре города ($J < 1,0$) до очень высоких для крупных лесомассивов ($J > 150,0$). Это подтвердило теоретическое положение о том, что устойчивость точечных элементов сильно варьируется и зависит от их масштаба, пространственного положения и уровня антропогенного воздействия.

Анализ факторов устойчивости продемонстрировал, что планировочный потенциал в наибольшей степени определяется площадью объекта, архитек-

турно-планировочными характеристиками и породным составом озеленения. Антропогенная нагрузка характеризуется показателями шумового фона, концентрации загрязняющих веществ и рекреационной нагрузки. Выявленная поляризация значений индекса J свидетельствует о необходимости дифференцированного подхода к управлению различными объектами ВЗК — от интенсивной ревитализации деградированных элементов до сохранения и поддержания высокоустойчивых природных ядер.

Пространственный анализ распределения индекса устойчивости J выявил четкую закономерность: наиболее низкие значения характерны для объектов, расположенных в зонах с большой транспортной нагрузкой и плотной застройкой, тогда как наиболее высокие значения отмечаются у объектов, находящихся в периферийных районах и имеющих значительную площадь. Это подтверждает гипотезу о том, что устойчивость элементов ВЗК напря-

мую зависит от их интеграции в природный каркас и уровня антропогенного давления.

Определение весовых коэффициентов модели

С помощью МАИ определен вектор приоритетов, формализующий вклад элементов в устойчивость системы:

- продольные пояса ($a = 0,571$). Наибольший вес, что теоретически обосновано их ролью как носителей основной массы биоразнообразия и детерминантов пространственной структуры линейной ГС;
- поперечные коридоры ($b = 0,286$). Существенный вес подтверждает теоретическую гипотезу о критической важности связности для целостности и устойчивости линейной системы к фрагментации;
- узлы ($c = 0,143$). Наименьший вес указывает на их зависимую роль: без интеграции в сеть поясов и коридоров их локальная устойчивость не обеспечивает устойчивости системы в целом.

Статистический анализ согласованности экспертных оценок показал высокую надежность полученных весовых коэффициентов. Индекс согласованности составил 0,0005 при отношении согласованности 0,0009, что значительно ниже порогового значения 0,1. Это свидетельствует о высокой степени согласованности экспертных суждений и надежности полученных результатов. Распределение весовых коэффициентов подтверждает системообразующую роль продольных поясов в линейной градостроитель-

ной системе и подчеркивает важность развития связности как ключевого фактора устойчивости.

На основе рассчитанных компонентов ($J_{\Pi} = 0,179$; $J_{\kappa} = 0,098$; $J_{\gamma} = 1,17$) получено значение интегрального показателя для Волгограда: $Y_{\text{ВЗК}} = 0,298$.

Полученное значение соответствует категории «Низкая устойчивость (критическое состояние)» по предложенной шкале (табл.), что количественно подтверждает выводы качественного анализа о системной деградации каркаса. Низкие значения J_{Π} и J_{κ} свидетельствуют о разрушении системообразующих и связующих элементов, а относительно высокое значение J_{γ} не компенсирует этот дисбаланс, что теоретически подтверждает наличие структурных проблем.

Анализ вклада отдельных компонентов в интегральный показатель показал, что наибольший негативный вклад вносят низкие значения индексов продольных поясов и поперечных коридоров. Это свидетельствует о системном характере проблем ВЗК Волгограда, связанных с нарушением целостности структуры каркаса. Относительно высокое значение индекса узловых элементов объясняется наличием нескольких крупных природных территорий, которые, однако, не интегрированы в единую систему и не могут компенсировать общую структурную деградацию каркаса.

Проведенный анализ позволяет определить приоритетные направления повышения устойчивости

Шкала оценки интегрального показателя устойчивости ВЗК $Y_{\text{ВЗК}}$
Scale for assessing the integral indicator of WGF stability Y_{WGF}

$Y_{\text{ВЗК}}$ Y_{WGF}	Категория устойчивости Sustainability category	Характеристика состояния системы Characteristics of the system state
0,00–0,30	Низкая (критическое состояние) Low (critical condition)	Сильная фрагментация элементов каркаса, отсутствие экологических коридоров, низкое биоразнообразие, высокая уязвимость к антропогенному воздействию Strong fragmentation of the framework elements, lack of ecological corridors, low biodiversity, and high vulnerability to anthropogenic impact
0,31–0,50	Недостаточная (напряженное состояние) Insufficient (stressed state)	Наличие отдельных элементов при слабых связях, ограниченная способность к саморегуляции, фрагментарное выполнение рекреационных и экологических функций The presence of individual elements with weak connections, limited ability to self-regulate, and fragmented performance of recreational and environmental functions
0,51–0,70	Средняя (стабильное состояние) Average (stable state)	Сформированная, но не оптимальная структура, наличие основных связей между элементами, выполнение базовых рекреационных и экологических функций A formed but not optimal structure, the presence of basic connections between elements, and the performance of basic recreational and environmental functions
0,71–0,85	Высокая (оптимальное состояние) High (optimal condition)	Хорошо развитая связная структура, эффективное выполнение функций, высокое биоразнообразие, наличие резервов для компенсации нагрузок A formed but not optimal structure, the presence of basic connections between elements, and the performance of basic recreational and environmental functions
0,86–1,00	Очень высокая (эталонное состояние) Very high (reference condition)	Идеально сбалансированная структура, максимальная экологическая эффективность, полная интеграция в градостроительную систему Perfectly balanced structure, maximum environmental efficiency, and full integration into the urban planning system

ВЗК: развитие системы продольных поясов через увеличение доли озелененных территорий и улучшение их функционального разнообразия; восстановление поперечных связей за счет реабилитации овражно-балочной системы и создания новых экологических коридоров; оптимизация системы узловых элементов через повышение их устойчивости и улучшение интеграции в общую структуру каркаса.

Ключевой особенностью предложенной методологии является ее способность выявлять системные проблемы каркаса, а не просто констатировать недостатки благоустройства территории, что позволяет перейти от точечного благоустройства к стратегическому развитию ВЗК как целостной системы. Полученная количественная интегральная оценка со шкалой градации обеспечивает адаптивность методологии, что дает возможность применять ее для анализа других линейных ГС со схожими условиями. Это обуславливает широкую практическую значимость методологии для целей стратегического планирования и устойчивого развития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Настоящее исследование позволило провести количественную оценку устойчивости водно-зеленого каркаса Волгограда, которая была классифицирована как низкая ($Y_{ВЗК} = 0,298$), и выявить системные структурные проблемы. Структура весовых коэффициентов ($a = 0,571$, $b = 0,286$, $c = 0,143$) обладает важным теоретическим и практическим значением, так как указывает на приоритетность направлений развития: инвестиции в развитие продольных поясов и поперечных коридоров будут иметь больший эффект для повышения общей устойчивости системы, чем изолированное благоустройство даже самых крупных узлов.

Полученные данные о поляризации индекса устойчивости узлов J согласуются с результатами других исследований о дифференцированном состоянии зеленых насаждений в крупных промышленных городах [22–24]. Предложенная методология позволяет не только констатировать этот факт, но и количественно ранжировать объекты по степени деградации, определяя первоочередные объекты для ревитализации.

Разработанная методология является адаптируемой. Представленные алгоритм, система показателей и принципы расчета могут быть применены для оценки ВЗК других линейных градостроительных систем, расположенных вдоль крупных рек или транспортных артерий. Однако весовые коэффициенты (a , b , c) и пороговые значения показателей могут нуждаться в корректировке с учетом региональной специфики.

Таким образом, исследование подтвердило эффективность разработанной методологии формирования и оценки модели водно-зеленого каркаса для линейных градостроительных систем. Теоретиче-

ской основой методологии выступает модель ВЗК как иерархической структуры, состоящей из взаимосвязанных продольных поясов, поперечных коридоров и узлов, что позволяет адекватно отражать пространственную организацию линейных ГС. Ключевой результат — разработка интегрального показателя устойчивости $Y_{ВЗК}$, который агрегирует разнородные характеристики элементов каркаса в единую количественную оценку. Применение метода анализа иерархий для определения весовых коэффициентов дало возможность объективно формализовать вклад каждого элемента в общую устойчивость системы.

Апробация методологии на примере Волгограда показала ее практическую эффективность, выявив критическое состояние ВЗК ($Y_{ВЗК} = 0,298$) и структурные причины этого состояния — деградацию продольных поясов и поперечных связей. Это подтверждает, что методология является не только диагностическим, но и стратегическим инструментом, указывающим приоритетные направления для градостроительных решений. Важный практический вывод исследования — доказательство необходимости смещения фокуса градостроительной политики с точечного благоустройства отдельных объектов озеленения на комплексное развитие системы ВЗК как целостного пространственного образования. Высокий вес продольных поясов (57,1 %) свидетельствует о том, что именно они должны стать основным объектом стратегических инвестиций, поскольку формируют структуру линейной ГС и аккумулируют ее экологический потенциал. Не менее значимым стал вывод о критической роли поперечных связей. Несмотря на меньший весовой коэффициент (28,6 %), именно деградация поперечных коридоров служит ключевым фактором фрагментации каркаса Волгограда. Следовательно, реабилитация овражно-балочных систем и долин малых рек, а также создание новых поперечных бульваров и аллей должны рассматриваться как стратегический приоритет для восстановления связности и экологической эффективности ВЗК.

Полученные количественные оценки, в частности шкала градации $Y_{ВЗК}$, предоставляют органам власти и проектировщикам инструмент для мониторинга состояния каркаса и оценки эффективности принимаемых управленческих решений. Это дает возможность перейти от субъективных экспертных оценок к доказательному планированию в сфере развития городской среды.

Перспективы дальнейших исследований связаны не только с развитием динамического аспекта модели, но и с интеграцией предложенной методологии с инструментами экономического анализа. Оценка стоимости реабилитационных мероприятий для различных элементов каркаса и расчет их ожидаемого влияния на рост $Y_{ВЗК}$ позволят сформировать экономически обоснованные программы развития ВЗК и оптимизировать бюджетные расходы в условиях ограниченных ресурсов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Forman R.T.T.* Urban Ecology: Science of Cities. Cambridge : Cambridge University Press, 2014. 474 p.
2. *Антюфеев А.В.* Природно-ландшафтные основы формирования линейных градостроительных систем (на примере «Большого Волгограда») // Фундаментальные поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году : сб. науч. тр. РААСН в 2 т. 2021. Т. 1. С. 185–191. EDN QMJ0YJ.
3. *Ahern J.* Green infrastructure for cities: The spatial dimension // *Cities of the Future Towards Integrated Sustainable Water and Landscape Management*. London : IWA Publishing, 2007. Pp. 267–283.
4. *Benedict M.A.* Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities. Washington DC : Island Press, 2006. 299 p.
5. *Мусаев Т.И.* Стратегическое градостроительное планирование: перспективы развития в новых условиях // *Архитектура и современные информационные технологии*. 2025. № 1 (70). С. 292–302. DOI: 10.24412/1998-4839-2025-1-292-302. EDN XBKSOE.
6. *Chen W.Y., Jim C.Y.* Assessment and valuation of the ecosystem services provided by urban forests // *Ecology, Planning, and Management of Urban Forests*. 2008. Pp. 53–83. DOI: 10.1007/978-0-387-71425-7_5
7. *Cook E.A.* Landscape structure indices for assessing urban ecological networks // *Landscape and Urban Planning*. 2002. Vol. 58. Issue 2–4. Pp. 269–280. DOI: 10.1016/S0169-2046(01)00226-2
8. *Краснощечкова Н.С.* Природный каркас в проекте Концепции Московской агломерации: нормативно-методические и правовые аспекты // *Academia. Архитектура и строительство*. 2014. № 4. С. 9. EDN TDNXTR.
9. *Mell I.C.* Green infrastructure: concepts, perceptions and its use in spatial planning : doctoral dissertation. Newcastle : School of Architecture, Planning and Landscape, Newcastle University, 2010. 413 p.
10. *Перькова М.В., Ладик Е.И.* Овражно-балочные ландшафты в структуре урбанизированных территорий г. Белгорода // *Фундаментальные поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2022–2023 годы : науч. тр. РААСН в 2 т. 2024. С. 521–532. EDN IORIPX.*
11. *Гущин А.Н., Дивакова М.Н.* Водно-зеленый каркас Екатеринбурга: история, проблемы, будущее // *Архитектон: известия вузов*. 2022. № 2 (78). DOI: 10.47055/1990-4126-2022-2(78)-21. EDN WGGFJG.
12. *Borelli S., Chen Y., Conigliaro M., Salbitano F.* Green infrastructure: a new paradigm for developing cities // *XIV World Forestry Congress*. 2015. DOI: 10.13140/RG.2.1.1689.8320
13. *Vitulano V.* Integrating green infrastructure in Italian urban plans. Lessons from Turin and Bologna // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Urban Design and Planning*. 2024. Vol. 177. Issue 2. Pp. 45–56. DOI: 10.1680/jurdp.22.00049. EDN IEUNVF.
14. *Aly S.S.A., Amer M.S.E.* Green Corridors as a response for nature: Greening Alexandria city by creating a green infrastructure network // *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2010. Vol. 1. Pp. 101–117. DOI: 10.2495/DN100101
15. *Kato S.* Green Infrastructure for Asian Cities: The Spatial Concepts and Planning Strategies // *Proceedings of the 2011 International Symposium on City Planning*. Seoul : Korea Planners Association, 2011. Pp. 161–170.
16. *Grădinaru S.R., Hersperger A.M.* Green infrastructure in strategic spatial plans: Evidence from European urban regions // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2019. Vol. 40. Pp. 17–28. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.04.018
17. *Mahmoud I.* Nature-based solutions across spatial urban scales: three case studies from Nice, Utrecht and Milan // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Urban Design and Planning*. 2024. Vol. 177. Issue 3. Pp. 109–122. DOI: 10.1680/jurdp.23.00063
18. *Иванова Н.В., Ганжа О.А.* Ландшафтно-экологические особенности формирования комфортной среды умного города (на примере исторического строительства зеленого кольца Сталинграда – Волгограда) // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2017. № 49 (68). С. 153–166. EDN ZGRUIN.
19. *Анопин В.Н., Солодовников Д.А., Степанова Е.А.* Адаптивно-ландшафтные технологии восстановления и преобразования насаждений Зеленого кольца г. Волгограда // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2019. № 1 (74). С. 138–150. EDN PHUNUO.
20. *Еланцева А.А., Ельникова Ю.С.* Оценка биоразнообразия герпетобионтов на урбанизированной территории // *Ученые записки Орловского государственного университета*. Серия: Естественные, технические и медицинские науки. 2015. № 4. С. 149–154. EDN UZDFPB.
21. *Беликова Г.И., Витковская Л.В.* Основы теории вероятностей и элементы математической статистики : учебное пособие. СПб. : РГГМУ, 2018. 160 с. EDN YOSEYX.
22. *Прокопенко В.В., Плешаков И.Н.* Принципы и этапы формирования эколого-градостроитель-

ного каркаса Волгограда // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. № 1 (86). С. 218–229. EDN KOVKHP.

23. Прокопенко В.В. Основные теоретические аспекты формирования системы озелененных территорий в городской среде // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строитель-

ного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. № 1 (90). С. 224–237. EDN EOJZFR.

24. Прокопенко В.В. Основные методики оценки зеленого каркаса крупнейшего города // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. № 5 (93). С. 155–167. EDN CQIRZW.

Поступила в редакцию 16 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 19 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 19 февраля 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: **Вячеслав Валентинович Прокопенко** — кандидат технических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой урбанистики и теории архитектуры, Институт архитектуры и строительства; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; SPIN-код: 5833-4999, РИНЦ ID: 793500, Scopus: 57202817435, ResearcherID: AHA-7525-2022, ORCID: 0000-0002-8161-9766; v.v.p_24@mail.ru.

REFERENCES

1. Forman R.T.T. *Urban Ecology: Science of Cities*. Cambridge, Cambridge University Press, 2014; 474.
2. Antyufeev A. Natural basis for formation of linear urban systems (on the example of “great Volgograd”). *Fundamental, exploratory and applied research of RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2020 : collection of scientific papers of RAASN*. 2021; 1:185-191. EDN QMJOYJ. (rus.).
3. Ahern J. Green infrastructure for cities: The spatial dimension. *Cities of the Future Towards Integrated Sustainable Water and Landscape Management*. London, IWA Publishing, 2007; 267-283.
4. Benedict M.A. *Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities*. Washington DC, Island Press, 2006; 299.
5. Musaev T.I. Strategic urban planning: development prospects in new conditions. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2025; 1(70):292-302. DOI: 10.24412/1998-4839-2025-1-292-302. EDN XBKSOE. (rus.).
6. Chen W.Y., Jim C.Y. Assessment and valuation of the ecosystem services provided by urban forests. *Ecology, Planning, and Management of Urban Forests*. 2008; 53-83. DOI: 10.1007/978-0-387-71425-7_5
7. Cook E.A. Landscape structure indices for assessing urban ecological networks. *Landscape and Urban Planning*. 2002; 58(2-4):269-280. DOI: 10.1016/S0169-2046(01)00226-2
8. Krasnoshchokova N.S. The natural framework in the draft concept of the Moscow agglomeration: normative, methodological and legal aspects. *Academia. Architecture and Construction*. 2014; 4:9. EDN TDNXTR. (rus.).
9. Mell I.C. *Green infrastructure: concepts, perceptions and its use in spatial planning : doctoral dissertation*. Newcastle, School of Architecture, Planning and Landscape, Newcastle University, 2010; 413.
10. Perkova M.V., Ladik E.I. Ravine-beam landscapes in the structure of urbanized territories of Belgorod. *Fundamental, exploratory and applied research of RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2022–2023 : Scientific works of RAASN in 2 vol*. 2024; 521-532. EDN IORIPX. (rus.).
11. Gushchin A.N., Divakova M.N. The water and planting infrastructure framework of Yekaterinburg: past, problems, and future. *Architecton: Proceedings of Higher Education*. 2022; 2(78). DOI: 10.47055/1990-4126-2022-2(78)-21. EDN WGGFJG. (rus.).
12. Borelli S., Chen Y., Conigliaro M., Salbitano F. Green infrastructure: a new paradigm for developing cities. *XIV World Forestry Congress*. 2015. DOI: 10.13140/RG.2.1.1689.8320
13. Vitulano V. Integrating green infrastructure in Italian urban plans. Lessons from Turin and Bologna. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Urban Design and Planning*. 2024; 177(2):45-56. DOI: 10.1680/jurdp.22.00049. EDN IEUNVF.
14. Aly S.S.A., Amer M.S.E. Green Corridors as a response for nature: Greening Alexandria city by creating a green infrastructure network. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2010; 1:101-117. DOI: 10.2495/DN100101
15. Kato S. Green Infrastructure for Asian Cities: The Spatial Concepts and Planning Strategies. *Proceedings of the 2011 International Symposium on City*

Planning. Seoul, Korea Planners Association, 2011; 161-170.

16. Grădinaru S.R., Hersperger A.M. Green infrastructure in strategic spatial plans: Evidence from European urban regions. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2019; 40:17-28. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.04.018

17. Mahmoud I. Nature-based solutions across spatial urban scales: three case studies from Nice, Utrecht and Milan. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Urban Design and Planning*. 2024; 177(3):109-122. DOI: 10.1680/jurdp.23.00063

18. Ivanova N.V. E., Ganzha O.A. Landscape and ecological features of the formation of comfortable environment of smart cities (by the example of the historical construction of a “green ring” of Stalingrad – Volgograd). *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2017; 49(68):153-166. EDN ZGRUIN. (rus.).

19. Anopin V.N., Solodovnikov D.A., Stepanova E.A. Adaptive and landscape technologies for the restoration and transformation of the plantations of the green ring of Volgograd. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2019; 1(74):138-150. EDN PHUNUO. (rus.).

Received December 16, 2025.

Adopted in revised form on February 19, 2026.

Approved for publication on February 19, 2026.

20. Elanceva A.A., Elnicova Y.S. The herpetobiologist's evaluation from the urbanized territory. *Scientific Notes of Orel State University. Series: Natural, Technical and Medical Sciences*. 2015; 4:149-154. EDN UZDFPB. (rus.).

21. Belikova G.I., Vitkovskaya L.V. *Fundamentals of Probability Theory and Elements of Mathematical Statistics*. St. Petersburg, RGGMU, 2018; 160. EDN YOSEYX. (rus.).

22. Prokopenko V.V., Pleshakov I.N. Principles and stages of formation of the ecological and urban planning framework of Volgograd. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2022; 1(86):218-229. EDN KOVKHP. (rus.).

23. Prokopenko V.V. The main theoretical aspects of the formation systems of green areas in the urban environment. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2023; 1(90):224-237. EDN EOJZFR. (rus.).

24. Prokopenko V.V. The main methods of assessing the green framework of the largest city. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2023; 5(93):155-167. EDN CQIRZW. (rus.).

B I O N O T E S : **Vyacheslav V. Prokopenko** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department of Urban Studies and Theory of Architecture, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; SPIN-code: 5833-4999, ID RSCI: 793500, Scopus: 57202817435, ResearcherID: AHA-7525-2022, ORCID: 0000-0002-8161-9766; v.v.p_24@mail.ru.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.328.4:624.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.495-511

Расчет плит перекрытий монолитных каркасов с комбинированным армированием на эксплуатационные нагрузки и устойчивость к прогрессирующему обрушению

Игорь Андреевич Антаков¹, Алексей Борисович Антаков¹,
Антон Ринатович Гиздатуллин²

¹ Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ);
г. Казань, Республика Татарстан, Россия;

² Казанский Инженерный Проект (КазИнжПроект); г. Казань, Республика Татарстан, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. На данный момент применение композитной полимерной арматуры в несущих конструкциях зданий в основном сводится к фундаментам, что обусловлено физико-механическими свойствами композитов. С целью расширения области применения композитной арматуры предлагается рассмотреть возможность использования ее в качестве верхнего армирования плит перекрытий монолитных каркасов, подлежащих расчету на устойчивость к прогрессирующему обрушению.

Материалы и методы. Объектом численного исследования принято 10-этажное здание с каркасно-стеновой (смешанной) конструктивной системой. Для сравнения рассматривалось два варианта армирования плит перекрытий — сетками в нижней и верхней зонах: 1 — нижнее и верхнее армирование из арматурных стержней класса А500 ГОСТ 34028–2016; 2 — нижнее армирование из арматурных стержней класса А500 ГОСТ 34028–2016, верхнее из стеклокомпозитной арматуры (АСК) по ГОСТ 31938–2022. Расчеты выполнялись на основное сочетание нагрузок и на устойчивость к прогрессирующему обрушению с использованием программного комплекса «ЛИРА» версия 10.12. В результате расчетов определялись необходимые площади армирования плиты перекрытия первого этажа.

Результаты. Требуемая площадь армирования АСК при расчете на прогрессирующее обрушение в квазистатической постановке с величиной коэффициента динамичности $K_{дин} = 1,444$ превысила площадь при расчете на основное сочетание нагрузок на 7,46 %. При этом, если при расчете на основное сочетание нагрузок площадь верхнего армирования АСК превышала площадь стальной арматуры А500 на 39,35 %, то при расчете на прогрессирующее обрушение разница сократилась до 17,68 и 15,32 % соответственно для расчетов в квазистатической постановке с величинами коэффициента динамичности $K_{дин} = 1,444$ и $K_{дин} = 2$.

Выводы. Полученные результаты показали, что предложенное комбинированное армирование плит перекрытий с учетом выполнения расчетов на устойчивость к прогрессирующему обрушению позволяет более эффективно использовать композитную арматуру.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прогрессирующее обрушение, локальный отказ, неметаллическая арматура, композитная полимерная арматура, бетонные конструкции, стеклокомпозитная арматура

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Антаков И.А., Антаков А.Б., Гиздатуллин А.Р. Расчет плит перекрытий монолитных каркасов с комбинированным армированием на эксплуатационные нагрузки и устойчивость к прогрессирующему обрушению // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 4. С. 495–511. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.495-511

Автор, ответственный за переписку: Игорь Андреевич Антаков, igor788@bk.ru.

Design of floor slabs in monolithic frames with composite reinforcement for service loads and resistance to progressive collapse

Igor A. Antakov¹, Alexey B. Antakov¹, Anton R. Gizdatullin²

¹ Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE);
Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation;

² Kazan Engineering Project (KazInzhProject); Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. At the moment, the use of fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement in load-bearing structures of buildings is mainly reduced to foundations. This is due to the physical and mechanical properties of fibre-reinforced polymer.

To expand the field of application of composite reinforcement, it is proposed to use it as an upper reinforcement of slabs of monolithic concrete frames. The frame is designed to be resistant to progressive collapse.

Materials and methods. The object of the numerical study is a 10-storey building with a frame-wall structural system. For comparison, two options for reinforcing floor slabs were considered — bar mat in the lower and upper zones: 1 — lower and upper reinforcement from reinforcing bars of class A500 of National State Standard 34028–2016; 2 — lower reinforcement made of reinforcing bars of class A500, upper reinforcement made of glass fibre-reinforced polymer (GFRP) of National State Standard 31938–2022. Calculations were performed for the main combination of loads and for resistance to progressive collapse. The software package LIRA version 10.12 was used. As a result of the calculations, the required reinforcement areas of the first-floor slab were determined.

Results. The required reinforcement area of the GFRP when calculated for resistance to progressive collapse in a quasi-static formulation, with a dynamic factor of $K_{dyn} = 1.444$, exceeded the area when calculated for the main combination of loads by 7.46 %. The required area of the upper reinforcement of the ASK, calculated for the main combination of loads, exceeded the area of the A500 steel reinforcement by 39.35 %. When calculating for progressive collapse, the difference decreased to 17.68 and 15.32 %, respectively, for calculations in a quasi-static formulation with the values of the dynamic factors $K_{dyn} = 1.444$ and $K_{dyn} = 2$.

Conclusions. The proposed combined reinforcement of floor slabs, taking into account the calculations for resistance to progressive collapse, allows for more efficient use of FRP reinforcement.

KEYWORDS: progressive collapse, local destruction, non-metallic reinforcement, fibre-reinforced polymer reinforcement, concrete structures, glass fibre-reinforced polymer reinforcement

FOR CITATION: Antakov I.A., Antakov A.B., Gizdatullin A.R. Design of floor slabs in monolithic frames with composite reinforcement for service loads and resistance to progressive collapse. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(4):495-511. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.495-511 (rus.).

Corresponding author: Igor A. Antakov, igor788@bk.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на возросший объем исследований в области применения арматуры композитной полимерной (АКП) в качестве армирования бетонных конструкций, наличие действующих нормативных документов по производству АКП — ГОСТ 31938–2022 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия» и проектированию конструкций с таким армированием — СП 295.1325800.2017 «Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования», использование АКП в несущих конструкциях главным образом сводится к фундаментам зданий. Применение композитной арматуры для армирования стен, колонн и перекрытий ограничивается ее физико-механическими свойствами:

1. При высокой прочности на растяжение АКП обладает более низким модулем упругости в отличие от стальной арматуры. В связи с этим изгибаемые элементы с композитной арматурой имеют большую деформативность и ширину раскрытия трещин по сравнению с железобетонными аналогами. Требования по второй группе предельных состояний могут быть основными при проектировании таких конструкций [1–3]. В ранее проведенном исследовании [4] установлено, что предельные состояния по эксплуатационной пригодности балок с АКП наступают при 26,1–52,9 % от разрушающих нагрузок, у балок с преднапряженной композитной арматурой — 42,3–70,3 %. В то же время с уменьшением диаметра АКП изгибающие моменты, соответствующие предельным состояниям по эксплуатационной пригодности, приближаются к разрушающим. Следовательно, более эффективным является использование стержней меньшего диаметра. Таким

образом, высокая прочность композитов недоиспользуется. Данный недостаток можно компенсировать путем применения высокомодульной композитной арматуры [5]. Однако стоимость такой арматуры выше, из-за чего широкое использование ее в строительстве нецелесообразно.

2. Прочность АКП на сжатие существенно меньше, чем на растяжение. Согласно СП 295.1325800.2017 сопротивление композитной арматуры на сжатие принимается равным нулю. Ввиду малой изученности работы сжатых элементов с АКП под нагрузкой в методике СП 295.1325800.2017 приняты расчетные выражения, обеспечивающие запас их несущей способности [6].

3. Сопротивление композитной арматуры на растяжение при длительном действии нагрузки значительно меньше, чем при кратковременном. Согласно СП 295.1325800.2017 коэффициент снижения прочности при длительном действии нагрузки в зависимости от вида АКП составляет 0,3–0,6.

4. Конструкции с АКП имеют относительно низкую теплостойкость [7]. В сравнении с железобетонными элементами для обеспечения аналогичной огнестойкости бетонных элементов с АКП требуется увеличение защитного слоя бетона [8].

Действующие методики расчета конструкций с композитной арматурой разработаны на основе нормативных алгоритмов для железобетонных конструкций с введением ряда корректировок, учитывающих особенности АКП. Ключевые отличия методики расчета конструкций с АКП по СП 295.1325800.2017 от методики расчета железобетонных конструкций по СП 63.13330.2018 следующие:

1. В расчете прочности нормального сечения при отношении $\xi > \xi_R$ — перearмированные сечения, предполагается разрушение от дробления бето-

на в сжатой зоне вместо выражения по определению высоты сжатой зоны $x = \xi_R \cdot h_0$, используется:

$$x = \sqrt{(0,5\mu_f\alpha_{f2}h_0)^2 + \mu_f\alpha_{f2}\omega h_0^2 - 0,5\mu_f\alpha_{f2}h_0}. \quad (1)$$

Данная формула основывается на расчете прочности нормального сечения по деформационной модели исходя из горизонтального участка диаграммы деформирования бетона. Позволяет учесть повышение несущей способности элемента по нормальному сечению при увеличении площади растянутой арматуры при отношении $\xi > \xi_R$. Исследование [9] показало, что использование формулы (1) существенно увеличивает точность расчетов перearмированных сечений.

2. В расчете по образованию трещин изменена формула по установлению упругопластического момента сопротивления сечения для крайнего растянутого волокна бетона W_{pl} . Этот параметр применяется при определении момента трещинообразования M_{crc} . В первоначальной редакции СП 295.1325800.2017 данные выражения были идентичны методике расчета железобетонных конструкций СП 63.13330.2018:

$$M_{crc} = R_{bt,ser} \cdot W_{pl}; \quad (2)$$

$$W_{pl} = 1,3 \cdot W_{red}. \quad (3)$$

В формуле (3) под величиной 1,3 подразумевается коэффициент, учитывающий неупругие свойства бетона растянутой зоны сечения γ . В Изменении № 1 к СП 295.1325800.2017 в формулу (3) внесли корректировки:

$$W_{pl} = \gamma \cdot W_{red}; \quad (4)$$

$$\gamma = 1,73 - 0,005(B - 15). \quad (5)$$

К примеру, при классе бетона В25 коэффициент γ , определенный по формуле (5), будет равен 1,68. Таким образом, величина изгибающего момента при образовании трещин по методике СП 295.1325800.2017 больше, чем по СП 63.13330.2018. Также уменьшается коэффициент $\psi_f = 1 - 0,8 \cdot \frac{M_{crc}}{M}$, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами, который принимается во внимание при расчете ширины раскрытия трещин [10].

3. В расчетах по второй группе предельных состояний увеличены предельные величины ширины раскрытия трещин до 0,7 мм при непродолжительном раскрытии и 0,5 мм при продолжительном. Увеличено значение коэффициента ϕ_2 , учитывающего профиль продольной АКП, до 0,7 для арматуры периодического профиля.

В методике СП 63.13330.2012 базовое расстояние между трещинами l_f определяется по формуле:

$$l_f = 0,5 \frac{A_{bt}}{A_f} d_s, \quad (6)$$

принимается не менее $10d_s$ и 10 см, и не более $40d_s$ и 40 см.

В СП 295.1325800.2017 расчетное (формула (7)) и граничные значения l_f уменьшены в два раза:

$$l_f = 0,25 \frac{A_{bt}}{A_f} d_s, \quad (7)$$

принимается не менее $10d_f$ и 10 см, и не более $20d_f$ и 20 см.

Таким образом, величины ширины раскрытия трещин, определенные по методике СП 295.1325800.2017, будут меньше, чем по СП 63.13330.2018 [11]. Но даже с учетом этих корректировок методики расчета, повышающих «конкурентоспособность» АКП перед стальной арматурой, массовому использованию композитов в несущих конструкциях зданий препятствуют описанные выше физико-механические особенности композитов.

В последние годы в практике проектирования все более актуальным вопросом становится обеспечение устойчивости зданий и сооружений к прогрессирующему обрушению. Аварийные воздействия, вызывающие лавинообразное обрушение всего здания или его части, различного происхождения приводят к значительным экономическим потерям и человеческим жертвам. Причины локального разрушения разнообразны: природные (сейсмические, геологические, стихийные); техногенные (силовые, несиловые); чрезвычайные (взрывы, пожары, аварии, наезды транспортных средств); ошибки при проектировании и строительстве [12–14]. В исследовании [15] были проанализированы 40 случаев обрушений зданий в различных странах. Среди них ошибки при строительстве и проектировании (включая их взаимодействие) оказались наиболее частыми причинами, приводящими к первоначальному повреждению, ведущему к постепенному обрушению зданий (65 % случаев).

В настоящее время прогрессирующее обрушение зданий и сооружений является одной из наиболее важных тем научных работ [16, 17]. Отправной точкой резкого роста исследований в данной области можно считать обрушение башен Всемирного торгового центра в Нью-Йорке 11 сентября 2001 г. [18]. Анализ количества публикаций в базе Scopus с упоминанием терминов «progressive collapse» и «structure» показывает: до 2002 г. большинство исследований о прогрессирующем обрушении проводилось в США и Великобритании, где произошли обрушения зданий Ronan Point в Лондоне в 1968 г. и административного здания имени Альфреда Марра в столице штата Оклахома в 1995 г. После атак на Всемирный торговый центр в 2001 г. исследования активизировались, особенно в США, и Великобритания стала второй страной по объему исследований в этой области (2003–2007 гг.); в период с 2009 по 2017 г. ситуация изменилась, первое место по количеству публикаций занимает Китай, второе — США, третье — Великобритания [18, 19].

Учитывая имеющиеся недостатки конструкций с АКП, относительно низкие прочность при длительных нагрузках и огнестойкость, высокую деформативность и большую ширину раскрытия трещин, предлагается рассмотреть возможность использования композитной арматуры в качестве верхнего армирования плит перекрытий монолитных каркасов, подлежащих расчету на устойчивость к прогрессирующему обрушению. Предполагается армирование монолитных плит перекрытий выполнять двумя сетками: в нижней зоне из стальной арматуры, в верхней — из арматуры стеклокомпозитной (АСК).

Подразумевается, что данное конструктивное решение в такой расчетной ситуации позволит более эффективно использовать композитную арматуру. Располагая АКП в верхней зоне плиты, она будет защищена от воздействия высоких температур при пожаре не только защитным слоем бетона, но и стяжкой пола. При расчете каркаса на устойчивость к прогрессирующему обрушению требования к трещиностойкости отсутствуют, прогибы изгибаемых элементов не должны превышать $1/30$, $1/50$ пролета в зависимости от вида арматуры. Так как аварийное воздействие является кратковременным, в расчете будут использоваться расчетные характеристики материалов, равные их нормативным значениям. Соответственно коэффициент снижения прочности АКП при длительном действии нагрузки

учитываться не будет. Усилия в несущих элементах здания при расчете на прогрессирующее обрушение значительно больше, чем при расчете на основное сочетание нагрузок [13, 20]. Можно предположить, что требуемая площадь композитной арматуры будет также больше, чем при расчете на основное сочетание нагрузок. Для подтверждения или опровержения данного предположения были выполнены расчеты, представленные в настоящей статье.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом численного исследования принято 10-этажное здание прямоугольной формы в плане с размерами в осях $23,5 \times 15,0$ м, высота каждого этажа 3,3 м.

Конструктивная система здания — каркасно-стенная (смешанная), вертикальные несущие элементы — колонны и стены. Несущий каркас сооружения выполнен из монолитного железобетона. Стены толщиной 200 мм. Колонны сечением 450×450 мм и 400×400 мм. Плиты перекрытий и покрытия толщиной 200 мм с контурными балками сечениями $250 \times 500(h)$ мм. Схема расположения несущих элементов каркаса представлена на рис. 1. На рис. 2 изображен пространственный вид 3D-модели каркаса, на рис. 3 — расположение продольного армирования в конечных элементах (КЭ) плит перекрытий.

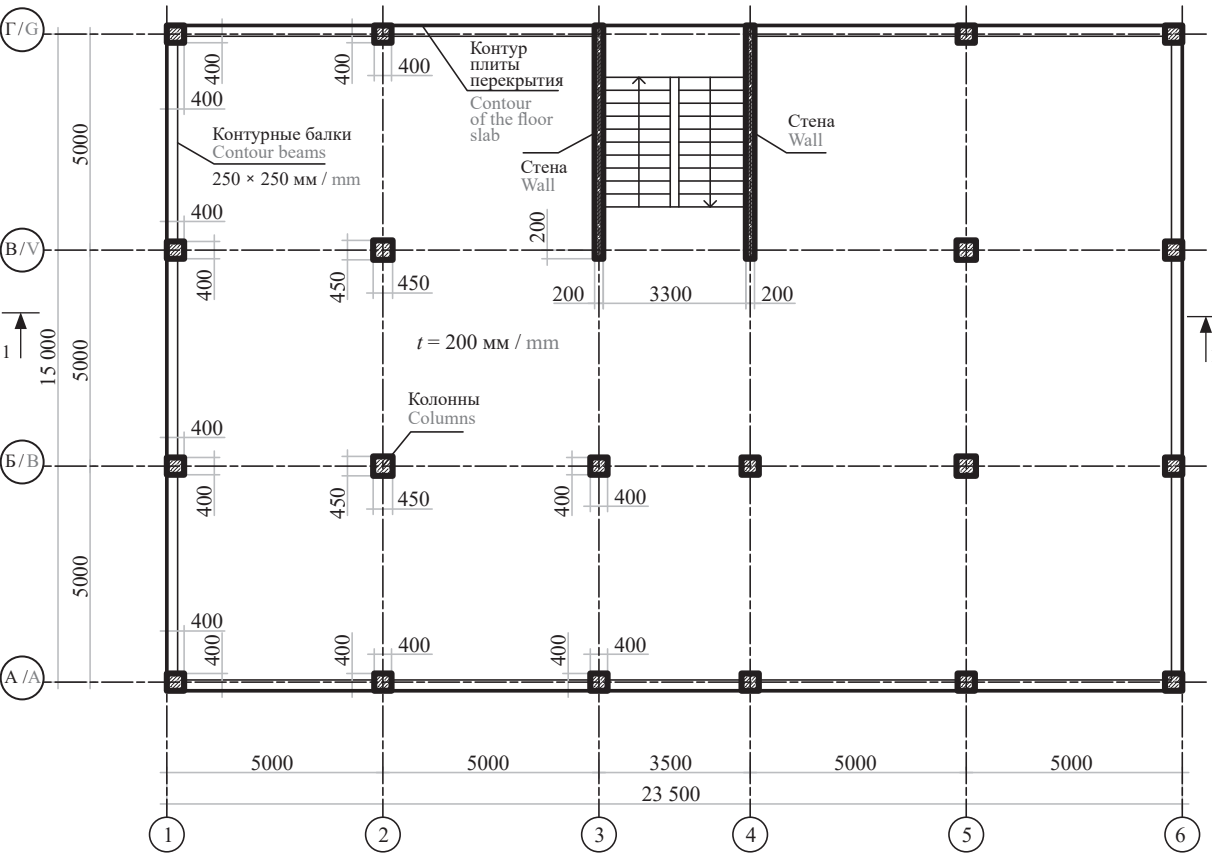


Рис. 1. Схема расположения несущих элементов каркаса

Fig. 1. Layout of the supporting elements of the frame

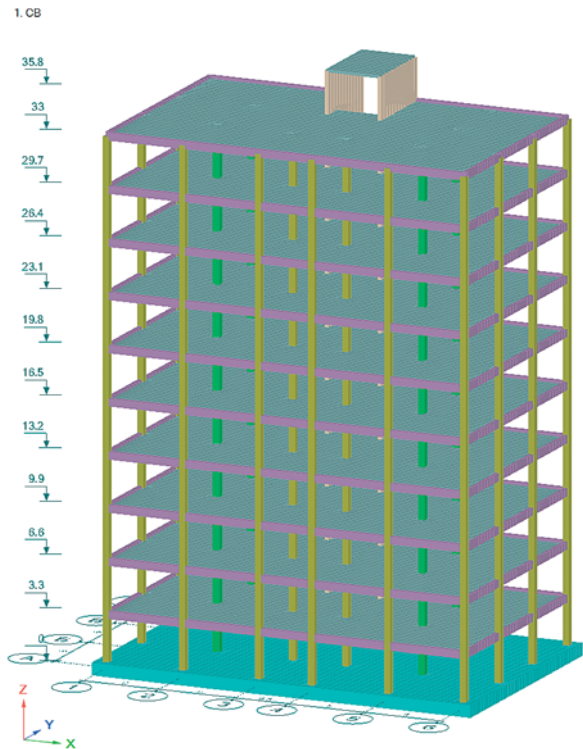


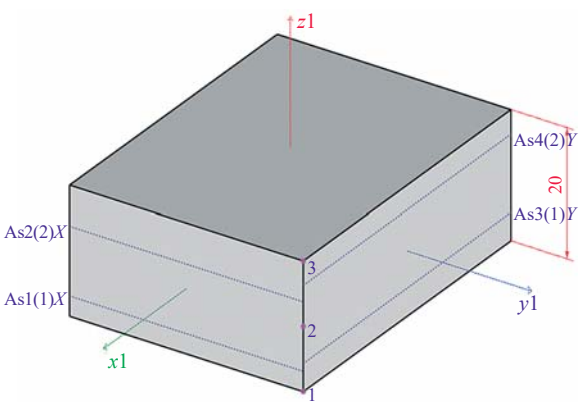
Рис. 2. Пространственный вид 3D-модели каркаса
Fig. 2. Spatial view of the 3D model of the frame

Несущие элементы здания приняты из бетона класса В25. Для сравнения рассматривалось два варианта армирования плит перекрытий — сетками в нижней и верхней зонах: 1 — нижнее и верхнее армирование из арматурных стержней класса А500 ГОСТ 34028–2016; 2 — нижнее армирование из арматурных стержней класса А500 ГОСТ 34028–2016, верхнее из АСК по ГОСТ 31938–2022. Расчет конструкций со стальной арматурой выполнялся согласно СП 63.13330.2018, с АСК — по СП 63.13330.2018 и СП 295.1325800.2017.

Характеристики АСК приняты на основании рекомендаций СП 295.1325800.2017 и ГОСТ 31938–2022: модуль упругости при растяжении — 50 ГПа, нормативная прочность на растяжение — 1000 МПа, расчетное сопротивление продольной арматуры на растяжение — 666,67 МПа, коэффициент снижения сопротивления растяжению при длительном действии нагрузки — 0,3. При расчете на устойчивость к прогрессирующему обрушению расчетное сопротивление продольной арматуры на растяжение принималось равным нормативному значению.

Расчеты выполнялись с помощью программного комплекса (ПК) «ЛИРА» версия 10.12, позволяющего использовать два вида арматуры в одном конечном элементе (расчетном сечении). Размер разбивки модели каркаса на КЭ — 0,43 × 0,43 м.

Балки и колонны моделировались универсальными пространственными стержневыми конечными элементами — тип 10, жестко сопряженными друг



Имя Name	Точка перекрытия Point of intersection	Расстояние от точки перекрытия, см Distance from the point of overlap, cm
As1(1)	1	3,1
As2(2)	3	–6,25
As3(1)	1	4,3
As4(2)	3	–3,75

Рис. 3. Расположение продольного армирования в КЭ плит перекрытий

Fig. 3. The location of the longitudinal reinforcement in finite elements of floor slabs

с другом. Для моделирования в нелинейной постановке использовались универсальные пространственные стержневые КЭ — тип 210. Плиты перекрытия и покрытия, стены моделировались элементами плоской оболочки, универсальные трех- и четырехугольные КЭ оболочки — тип 42 и 44, имеющими жесткое соединение между собой в узлах. С целью моделирования в нелинейной постановке применялись пространственные трех- и четырехугольные КЭ — тип 242 и 244. Всем узлам фундаментной плиты были запрещены перемещения по X, Y, Z, UX, UY, UZ.

При расчетах на устойчивость к прогрессирующему обрушению рассматривался локальный отказ (разрушение) колонны первого этажа, расположенной в осях 2/Б. По результатам расчетов анализировалось армирование плиты перекрытия первого этажа. Расчет железобетонных конструкций на прогрессирующее обрушение выполнялся по предельным состояниям первой группы и деформациям, прогибы изгибаемых элементов не должны превышать 1/30, 1/50 пролета в зависимости от вида арматуры.

В случае моделирования задач в нелинейной постановке, учитывающих выбранное армирование в линейных задачах, использовались следующие законы деформирования основного и армирующего материалов, соответствующие требованиям СП 63.13330.2018, СП 295.1325800.2017 и СП 385.1325800.2018: при расчете на основные сочетания нагрузок для бетона применен закон № 15 — экспоненциально зависимый бетон (рис. 4, а), для

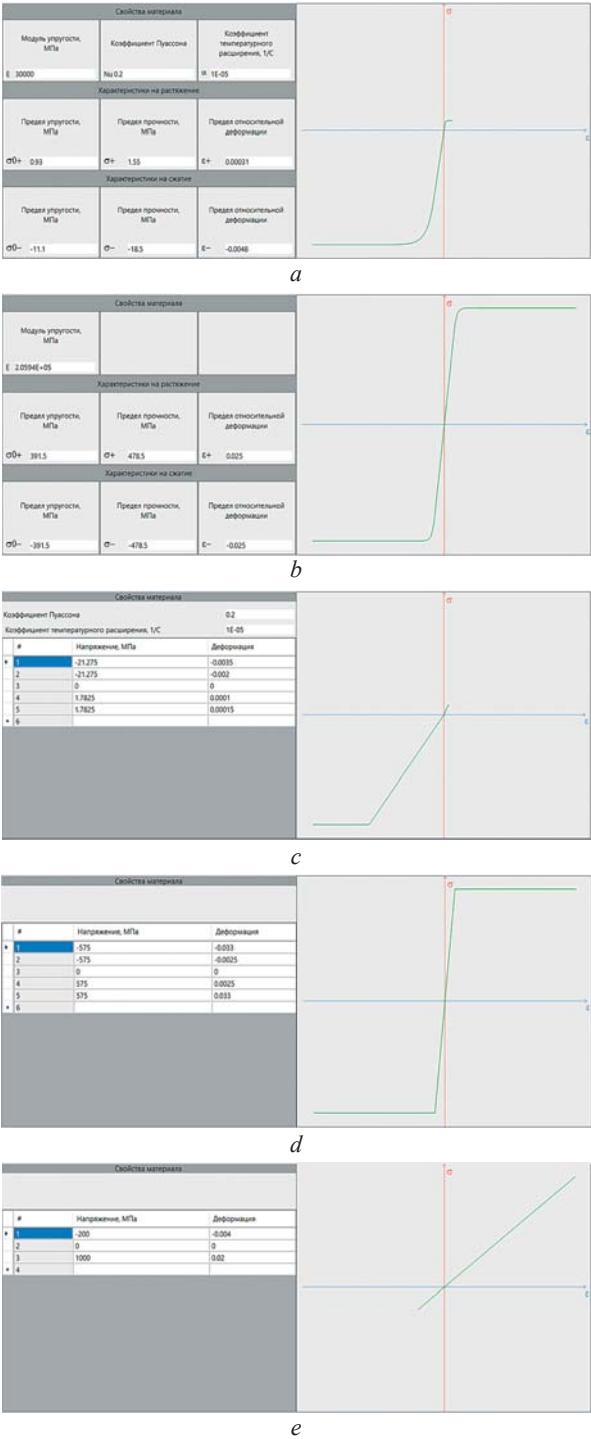


Рис. 4. Диаграмма деформирования: а — бетона для расчета на основные сочетания нагрузок; б — стальной арматуры для расчета на основные сочетания нагрузок; с — бетона для расчета на устойчивость к прогрессирующему обрушению; д — стальной арматуры для расчета на устойчивость к прогрессирующему обрушению; е — АСК для расчетов на основные сочетания нагрузок и устойчивость к прогрессирующему обрушению

Fig. 4. Stress-strain relation: a — of concrete used to calculate principal load combinations; b — of reinforcing steel used to calculate principal load combinations; c — of concrete used to calculate progressive collapse; d — of reinforcing steel used to calculate progressive collapse; e — of GFRP reinforcement used to principal load combinations and calculate progressive collapse

стальной арматуры закон № 11 — экспоненциально зависимый материал (рис. 4, б); при расчете на устойчивость к прогрессирующему обрушению для бетона и стальной арматуры применен закон № 14 — кусочно-линейное описание (рис. 4, с, д); для АСК закон № 14 — кусочно-линейное описание (рис. 4, е). При задании диаграммы деформирования бетона для вертикальных элементов также учитывался коэффициент $\gamma_{b3} = 0,85$. Расчеты на основные сочетания нагрузок в нелинейной постановке выполнялись для анализа деформаций плиты перекрытия.

На рис. 5 представлен фрагмент 3D-модели каркаса, используемой для нелинейных расчетов.

Собственный вес в ПК «ЛИРА» 10.12 определяется автоматически в зависимости от принятых жесткостей и коэффициента надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,1$. В табл. 1 представлены значения равномерно распределенных нагрузок на плиты перекрытий и покрытий.

Алгоритм расчетов:

1. Расчет на основное сочетание нагрузок в линейной постановке. На базе полученных результатов выполняется расчет по деформациям (определение прогибов) в нелинейной постановке.

2. Моделирование локального отказа в динамической линейной постановке с применением модулей «Монтаж» и «Динамика+». На основании данного расчета устанавливается коэффициент динамичности $K_{дин,П}$ моделирующий динамический эффект от мгновенного удаления колонны, который использовался в квазистатической задаче. $K_{дин,П}$ принят равным отношению максимального перемещения узла плиты перекрытия над удаляемой колонной к стабилизировавшемуся прогибу $K_{дин,П} = \Delta_{макс} / \Delta_{ст}$. Динамический расчет в нелинейной постановке с учетом рассматриваемого комбинированного армирования в используемом ПК нереализуем.

3. Расчет каркаса на устойчивость к прогрессирующему обрушению в квазистатической линейной постановке с применением *pull-down*-анализа. Выполнялся с учетом величин коэффициента динамичности $K_{дин,П} = \Delta_{макс} / \Delta_{ст}$, определенном при динамическом расчете — п. 2, и $K_{дин} = 2$. Использовался модуль «Монтаж», позволяющий произвести исключение демонтируемого элемента каркаса с учетом напряженно-деформированного состояния конструкций при условиях нормальной эксплуатации здания.

4. Расчет каркаса на устойчивость к прогрессирующему обрушению в квазистатической нелинейной постановке. Проводился с учетом величины коэффициента динамичности $K_{дин,П} = \Delta_{макс} / \Delta_{ст}$, определенном в п. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Результаты расчета на основное сочетание нагрузок. В результате расчетов каркаса получены мозаики интенсивности продольного армирования

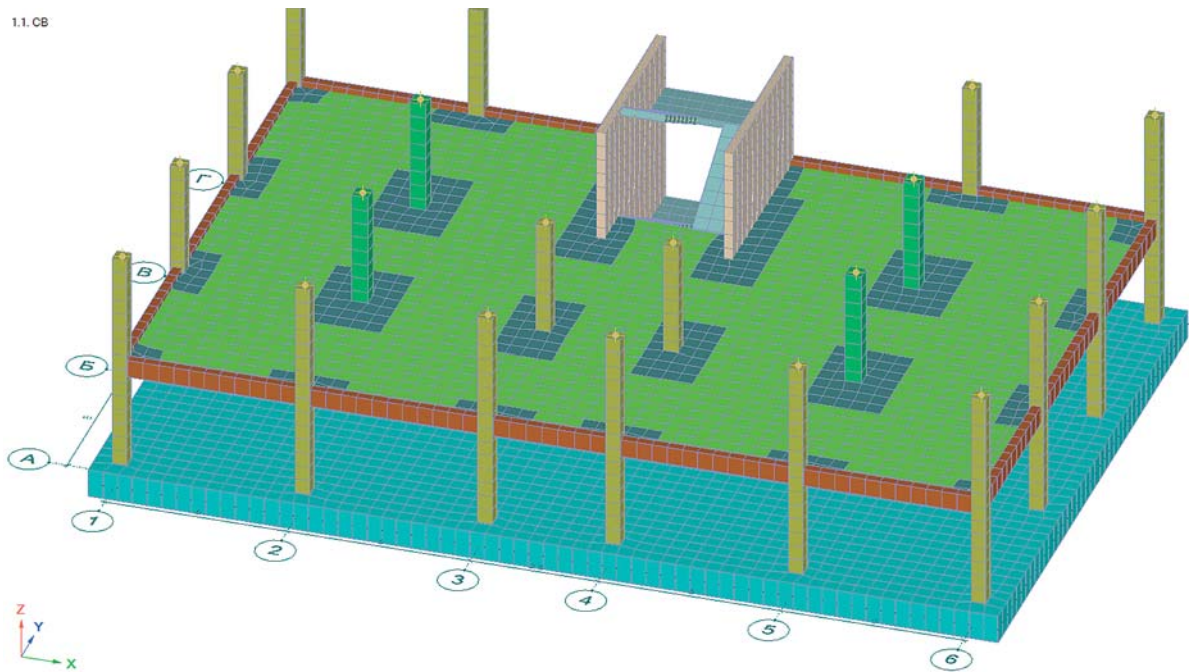


Рис. 5. Пространственный вид фрагмента 3D-модели каркаса для расчетов в нелинейной постановке

Fig. 5. Spatial view of a fragment of a 3D model of a framework for calculations in a nonlinear formulation

Табл. 1. Значения равномерно распределенных нагрузок на плиты перекрытий и покрытий

Table 1. Values of uniformly distributed loads on floor and roof slabs

Наименование нагрузки Load name	Нормативное значение, кН/м ² Standard value, kN/m ²	Коэффициент надежности γ_f Load safety factor γ_f	Расчетная нагрузка, кН/м ² Intended load, kN/m ²
<i>Постоянные нагрузки / Dead load</i>			
Нагрузка от элементов пола Load from floor elements	1,236	1,3	1,607
Нагрузка от элементов кровли Load from roof elements	1,766	1,3	2,296
Нагрузка от перегородок Load from the partitions	2,943	1,15	3,384
<i>Временные нагрузки / Live load</i>			
Временная нагрузка на перекрытия Live load on slabs	2	1,2	2,4
Снеговая нагрузка Snow load	2,3	1,4	3,22

плиты перекрытия 1-го этажа. На рис. 6 представлены итоги расчета по СП 295.1325800.2017.

Максимальные значения площади требуемого армирования при расчете на основные сочетания нагрузок представлены в табл. 2. Значения подобранного армирования даны по результатам расчета элементов по прочности и с учетом расчета по трещиностойкости. Предельно допустимые величины ширины раскрытия трещин для сечений с арматурой А500 принимались равными 0,3 мм при продолжительном раскрытии и 0,4 мм при непродолжительном. Для сечений с АСК эти величины,

согласно требованиям СП 295.1325800.2017, приняты 0,5 и 0,7 мм соответственно.

По результатам подбора верхнего армирования АСК, исходя из расчета прочности плиты, требуемые площади армирования по методикам СП 63.13330.2018 и СП 295.1325800.2017 схожи, максимальная разница в результатах — 9,7 %. Значения требуемых площадей верхнего армирования АСК с учетом расчета по трещиностойкости по методике СП 63.13330.2018 превышают данные по СП 295.1325800.2017 до 35,6 %.

По всей видимости, причинами различий в результатах расчета по трещиностойкости между ме-

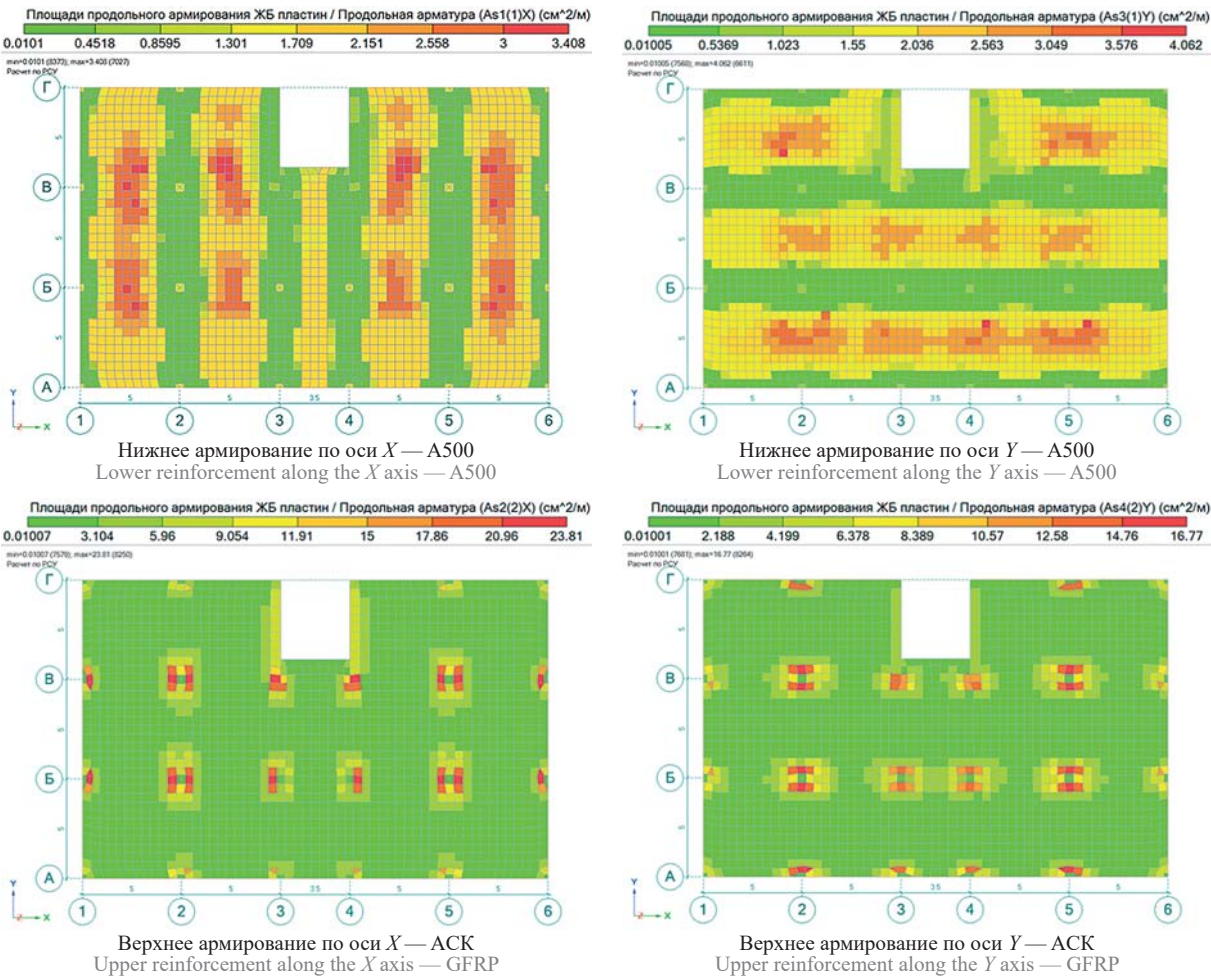


Рис. 6. Мозаики интенсивности нижнего (A500) и верхнего (ACK) армирования плиты перекрытия 1-го этажа — результаты расчета по СП 295.1325800.2017, $\text{см}^2/\text{м}$

Fig. 6. Mosaics of the intensity of the lower (A500) and upper (GFRP) reinforcement of the 1st floor slab — design results according to constructio.rules and regulations 295.1325800.2017, cm^2/m

тодиками СП 63.13330.2018 и СП 295.1325800.2017 являются описанные выше отличия по определению величин момента трещинообразования $M_{\text{срс}}$ и базового расстояния между трещинами l_f .

С учетом полученных требуемых площадей армирования был выполнен расчет плиты перекрытия в нелинейной постановке. Максимальное вертикальное перемещение плиты перекрытия с комбинированным армированием от действия нормативных нагрузок составляет 15,56 мм, что меньше предельно допустимого прогиба $[f] = L/203,92 = 6470/203,92 = 31,73$ мм. Максимальный прогиб плиты перекрытия со стальной арматурой в нижней и верхней зонах составил 9,86 мм.

2. Моделирование локального отказа в динамической линейной постановке. Перед решением динамической задачи осуществлен модальный анализ расчетной схемы с удаленной колонной. На рис. 7 представлены формы собственных колебаний поврежденной схемы, соответствующие (ассоциируемые) деформированной схеме при отказе.

В модели с динамическим нагружением задавался билинейный график изменения приложенных

с обратным знаком реакций демонтируемых элементов (рис. 8). Время отказа $t_{\text{отк}}$ задавалось по первой форме колебаний $t_{\text{отк}} = 0,1 \cdot T = 0,029$ с, где T — период первой формы собственных колебаний поврежденной схемы. Время воздействия и интегрирования принято равным 5 с. Демпфирование было задано с учетом частот двух форм колебаний 3,3865 и 3,4068 Гц и логарифмического декремента колебаний $\delta = 0,3$.

В отечественных нормативных документах отсутствуют рекомендации о времени исключения элемента $t_{\text{отк}}$. В нормах США рекомендуется $t_{\text{отк}}$ принимать не более $0,1 \cdot T$. В исследовании [21], где были выполнены расчеты многоэтажной металлической рамы с удалением средней колонны первого этажа, отмечалось, что усилия и перемещения мало зависят от времени исключения в диапазоне от 0,01 с до $0,1 \cdot T$. При времени отказа $t_{\text{отк}} = 0,01$ с моделируется мгновенное исключение элемента. При этом полное и мгновенное разрушение колонны — редкое событие. Внезапное и полное удаление колонны — это консервативное упрощение реального явления, и его можно наблюдать только в особых обстоятельствах [22].

Табл. 2. Результаты расчета плиты перекрытия на основные сочетания нагрузок

Table 2. The results of the design of the floor slab for the principal load combinations

Расположение и класс арматуры Location and type of reinforcement	Требуемая площадь армирования, см²/м Required reinforcement area, cm²/m		
	По прочности / By strength		
	По прочности и трещиностойкости	By strength and crack resistance	
	СП 63.13330.2018 A500, A500 Construction rules and regulations 63.13330.2018 A500, A500	СП 63.13330.2018 A500, ACK Construction rules and regulations 63.13330.2018 A500, GFRP	СП 295.1325800.2017 A500, ACK Construction rules and regulations 295.1325800.2017 A500, GFRP
Нижнее армирование A500 / Lower reinforcement A500			
Вдоль оси X Along the X axis	<u>3,081</u> 3,081	<u>2,994</u> 2,994	<u>3,396</u> 3,396
Вдоль оси Y Along the Y axis	<u>3,686</u> 3,686	<u>3,542</u> 3,542	<u>4,021</u> 4,021
Верхнее армирование A500 / Upper reinforcement A500			
Вдоль оси X Along the X axis	<u>8,076</u> 14,14	–	–
Вдоль оси Y Along the Y axis	<u>6,508</u> 9,957	–	–
Верхнее армирование ACK / Upper reinforcement GFRP			
Вдоль оси X Along the X axis	–	<u>15,42</u> 36,99	<u>14,07</u> 23,81
Вдоль оси Y Along the Y axis	–	<u>12,45</u> 25,73	<u>11,24</u> 16,77

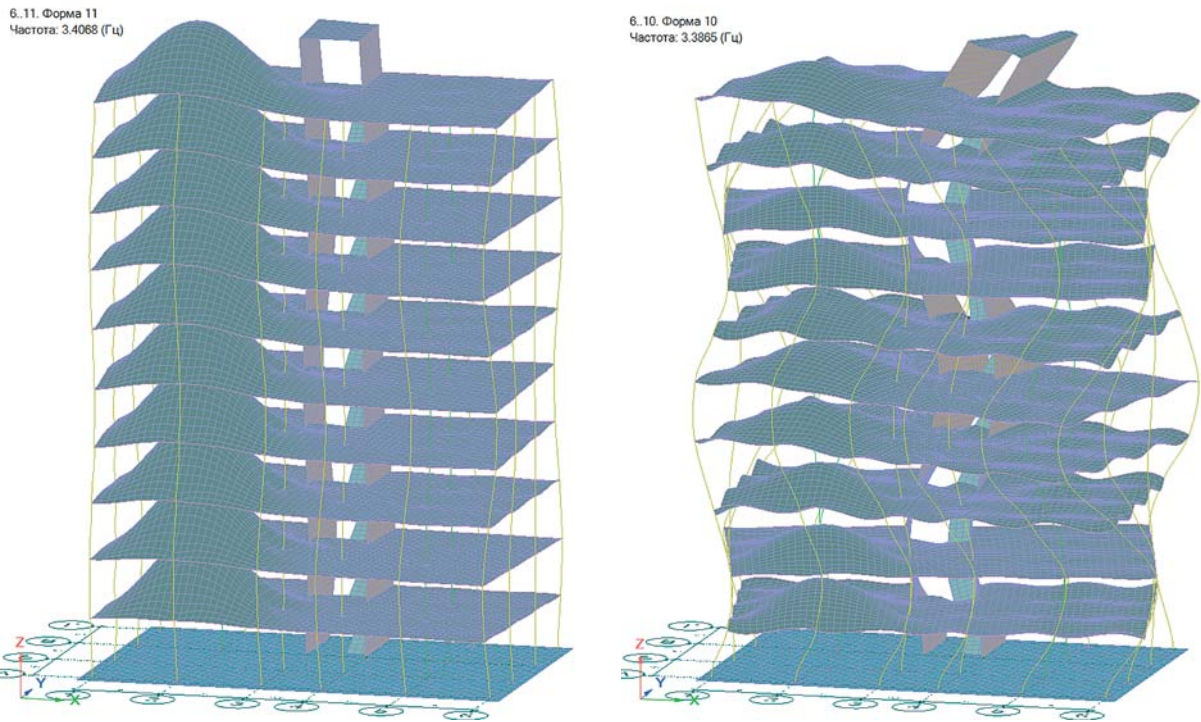


Рис. 7. Две формы собственных колебаний поврежденной схемы, соответствующие деформированной схеме при отказе

Fig. 7. Two forms of natural oscillations of the damaged scheme, corresponding to the deformed scheme at failure

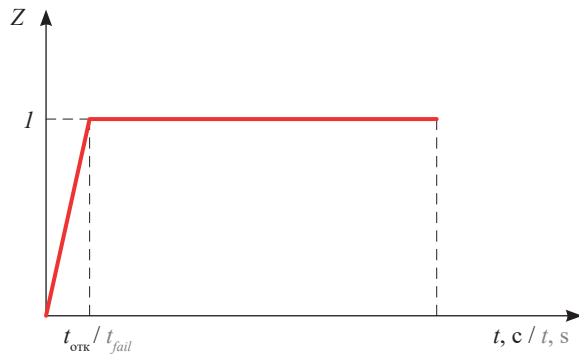


Рис. 8. График изменения приложенных с обратным знаком реакций демонтируемых элементов

Fig. 8. Graph of changes in the applied reactions of the dismantled elements with the reverse sign

На рис. 9 представлены деформированная схема каркаса при динамическом расчете и графики перемещения, скорости и ускорения узла перекрытия над удаляемой колонной вдоль оси Z. Коэффициент динамичности определялся по перемещениям узла плиты над удаляемой колонной, равный отношению максимального перемещения к стабилизировавше-

муся прогибу $K_{\text{дин,П}} = 51,793/35,879 = 1,444$. Стоит отметить, что при динамическом воздействии максимальные значения усилия в различных элементах системы достигаются не одновременно [23]. Ввиду достаточно большой трудоемкости расчетов в динамической постановке в большинстве случаев расчеты проводятся квазистатическим методом.

3. Расчет каркаса на устойчивость к прогрессирующему обрушению в квазистатической линейной постановке. Динамический эффект от мгновенного удаления колонны учитывался дополнительными нагрузками, приложенными к узлу перекрытия над удаляемой колонной. Данные нагрузки равны усилиям, действующим в колонне к моменту ее удаления, умноженные на величину $1 - K_{\text{дин,П}}$ и прикладываемые к расчетной схеме с обратным знаком.

Максимальный прогиб плиты перекрытия первого этажа в квазистатической задаче составил 50,91 мм. На рис. 10 приведены мозаики изгибающих моментов, действующих в плите перекрытия первого этажа при расчете в динамической постановке в момент времени 0,152 с, когда реализуется максимальное перемещение, и при расчете в квазистатической постановке.

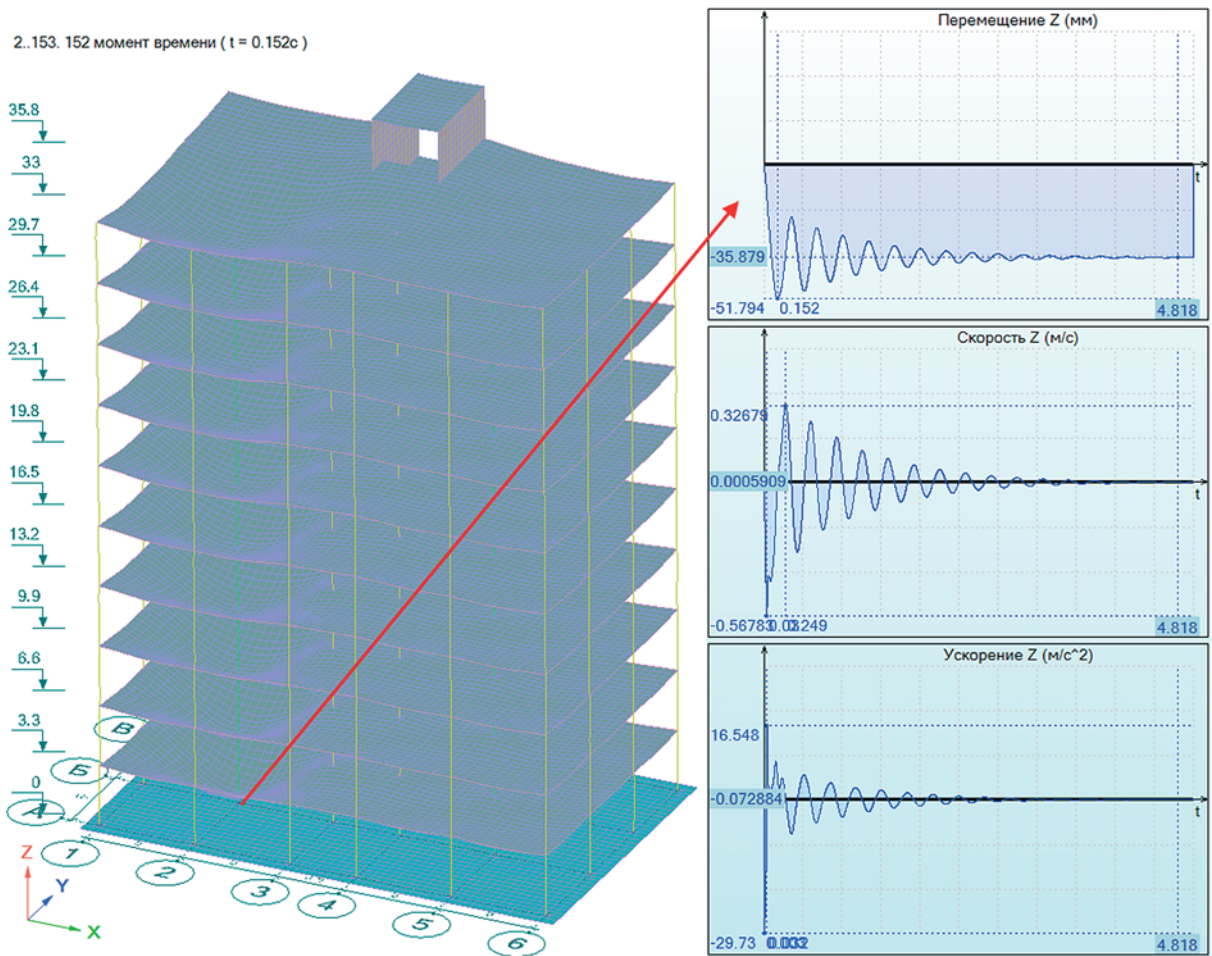


Рис. 9. Деформированная схема каркаса при динамическом расчете и графики перемещения, скорости и ускорения узла перекрытия над удаляемой колонной вдоль оси Z

Fig. 9. Deformed scheme of the framework in dynamic calculation and graphs of displacement, velocity and acceleration of the floor node above the removed column along the Z axis

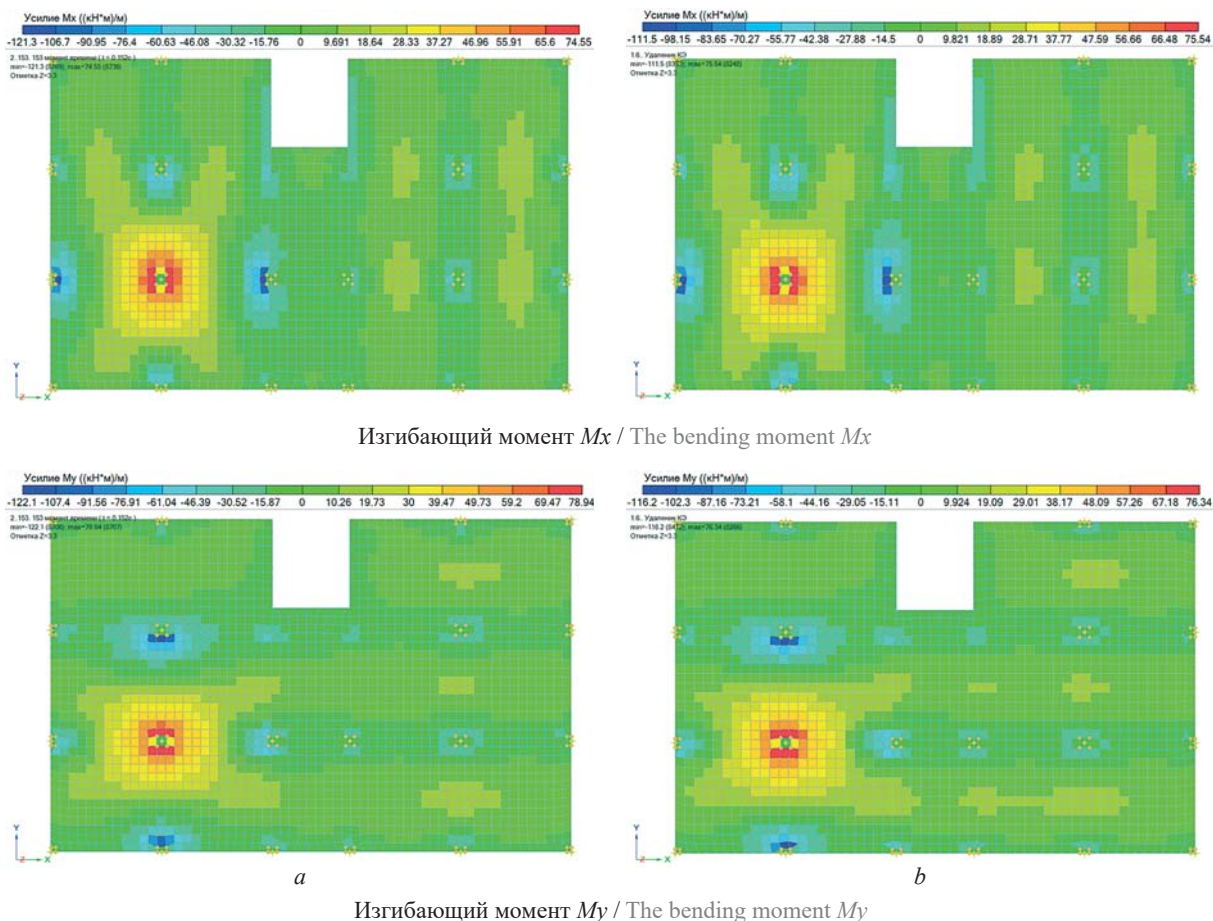


Рис. 10. Мозаики интенсивности изгибающих моментов M_x и M_y в плите перекрытия первого этажа: *a* — при расчете в динамической постановке; *b* — квазистатической, (кН·м)/м

Fig. 10. Mosaics of the intensity of bending moments M_x and M_y in the floor slab of the 1st floor: *a* — when calculated in a dynamic formulation; *b* — quasi-static, (кН·м)/m

Разница величин изгибающих моментов между двумя расчетами — в пределах 8 %.

В результате расчетов получены мозаики интенсивности продольного армирования плиты перекрытия первого этажа. На рис. 11 представлены результаты расчета по СП 63.13330.2018 и СП 295.1325800.2017.

Максимальные значения площади требуемого армирования при расчете на устойчивость к прогрессирующему обрушению в квазистатической постановке представлены в табл. 3.

Требуемая площадь верхнего армирования АСК плиты перекрытия по методикам СП 295.1325800.2017 и СП 63.13330.2018 вдоль оси Y схожа — 17,76 и 17,89 см²/м соответственно. Требуемая площадь верхнего армирования АСК вдоль оси X по методике СП 295.1325800.2017 больше, чем по СП 63.13330.2018. При этом у опор в осях 1/Б и 3/Б нижняя сжатая арматура А500 по методике СП 295.1325800.2017 принимается конструктивно, а по расчету СП 63.13330.2018 подобрана рабочая арматура с максимальной площадью 7,578 см²/м. По всей видимости, в ПК при расчете по методике СП 295.1325800.2017 выполняется требование

п. 6.1.4, в котором указано, что сопротивление композитной арматуры на сжатие равно нулю. В ходе расчета это требование выполняется несмотря на то, что в данной задаче армирование в сжатой зоне у опор принято из стальной арматуры. Проверочные расчеты плиты по прочности нормального сечения на опоре в осях 1/Б показывают, что для восприятия действующего изгибающего момента требуется установка продольной арматуры в сжатую зону. Что и происходит в расчете по методике СП 63.13330.2018. А в расчете по СП 295.1325800.2017 обеспечение несущей способности плиты производится за счет увеличения площади продольной растянутой арматуры. При этом напряжения в АСК значительно меньше ее предельной прочности на растяжение. Аналогичная ситуация складывается при расчете с коэффициентом динамичности $K_{дин} = 2$.

В табл. 4 представлены аналогичные данные по максимальным значениям площади требуемого армирования при расчете на устойчивость к прогрессирующему обрушению в квазистатической постановке при коэффициенте динамичности $K_{дин} = 2$. Этот подход к расчетам присутствовал в СП 385.1325800.2018 (до Изменения № 1), где в Приложении Б в неявном

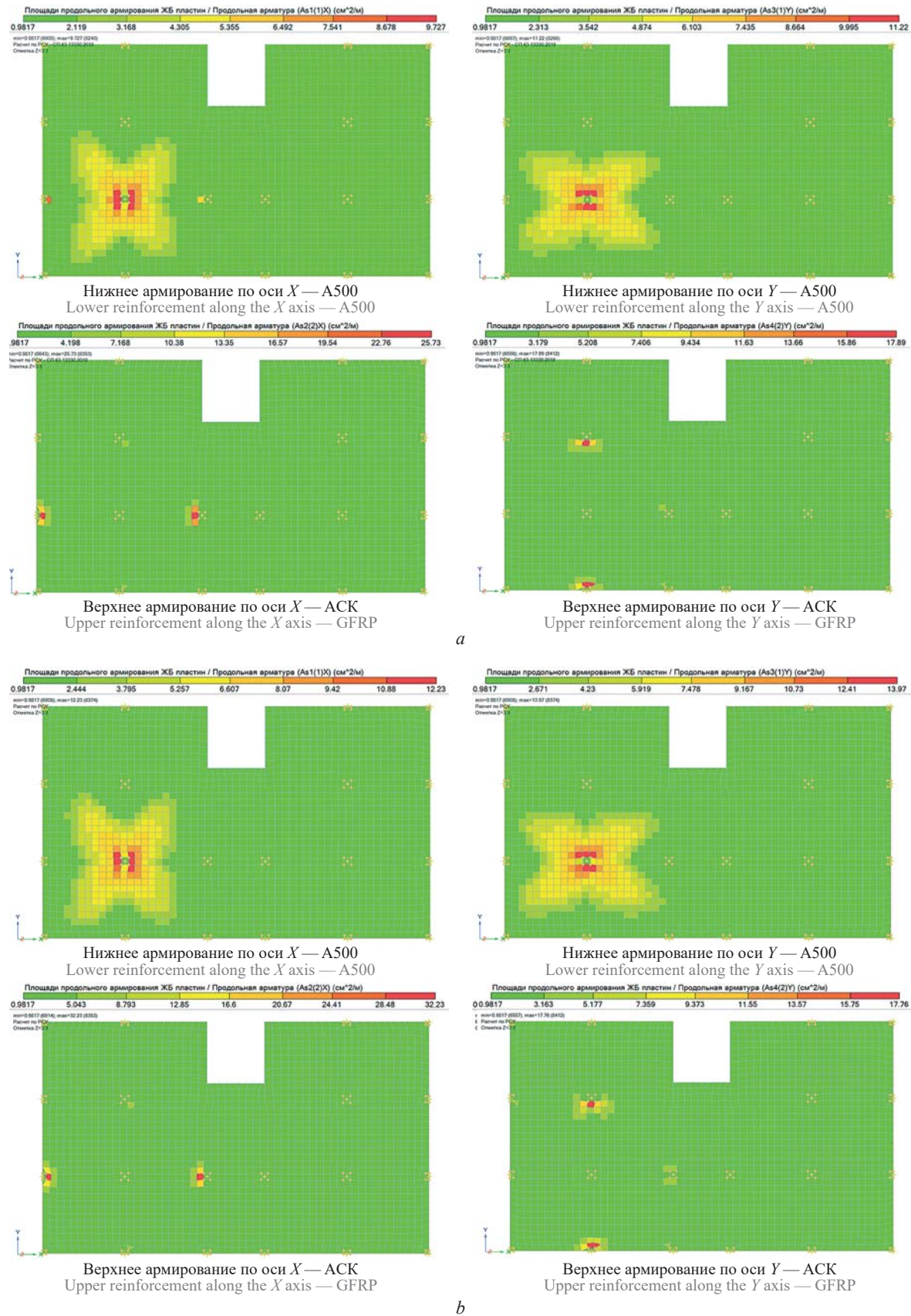


Рис. 11. Мозаики интенсивности нижнего (A500) и верхнего (ACK) армирования плиты перекрытия 1-го этажа: а — результаты расчета по СП 63.13330.2018, см²/м; б — результаты расчета по СП 295.1325800.2017, см²/м

Fig. 11. Mosaics of the intensity of the lower (A500) and upper (GFRP) reinforcement of the 1st floor slab: а — design results according to Construction rules and regulations 63.13330.2018, cm²/m; б — design results according to Construction rules and regulations 295.1325800.2017, cm²/m

Табл. 3. Результаты расчета плиты перекрытия 1-го этажа на устойчивость к прогрессирующему обрушению в квази-статической постановке при $K_{дин,П} = 1,444$

Table 3. The results of design the first-floor slab. Resistance to progressive collapse in a quasi-static formulation with $K_{dyn,D} = 1.444$

Расположение и класс арматуры Location and type of reinforcement	Требуемая площадь армирования, см²/м Required reinforcement area, cm²/m		
	СП 63.13330.2018 A500, A500 Construction rules and regulations 63.13330.2018 A500, A500	СП 63.13330.2018 A500, ACK Construction rules and regulations 63.13330.2018 A500, GFRP	СП 295.1325800.2017 A500, ACK Construction rules and regulations 295.1325800.2017 A500, GFRP
Нижнее армирование A500 / Lower reinforcement A500			
Вдоль оси X / Along the X axis	9,147	9,727	12,23
Вдоль оси Y / Along the Y axis	11,34	11,22	13,97
Верхнее армирование A500 / Upper reinforcement A500			
Вдоль оси X / Along the X axis	21,18	–	–
Вдоль оси Y / Along the Y axis	18,35	–	–
Верхнее армирование ACK / Upper reinforcement GFRP			
Вдоль оси X / Along the X axis	–	25,73	32,23
Вдоль оси Y / Along the Y axis	–	17,89	17,76

виде подразумевалось применение $K_{дин} = 2$ [21]. В Изменении № 1 к данному документу Приложение Б было исключено. При выполнении данного расчета для обеспечения необходимой несущей способности потребовалось увеличить толщину плиты перекрытия до 220 мм.

4. Расчет каркаса на устойчивость к прогрессирующему обрушению в квазистатической нелиней-

ной постановке. Расчет выполнялся с учетом коэффициента динамичности $K_{дин,П} = 1,444$. На рис. 12 показаны мозаики главных напряжений σ_1 в КЭ плиты перекрытия первого этажа. В процессе расчета после удаления колонны в схеме не образовались разрушенные КЭ. Максимальный прогиб плиты перекрытия составил 66,05 мм, что больше значения, определенного в динамической линейной задаче.

Табл. 4. Результаты расчета плиты перекрытия 1-го этажа на устойчивость к прогрессирующему обрушению в квази-статической постановке при $K_{дин} = 2$ и толщине плиты 220 мм

Table 4. The results of design the first-floor slab. Resistance to progressive collapse in a quasi-static formulation with $K_{dyn} = 2$ and a slab thickness of 220 mm

Расположение и класс арматуры Location and type of reinforcement	Требуемая площадь армирования, см²/м Required reinforcement area, cm²/m		
	СП 63.13330.2018 A500, A500 Construction rules and regulations 63.13330.2018 A500, A500	СП 63.13330.2018 A500, ACK Construction rules and regulations 63.13330.2018 A500, GFRP	СП 295.1325800.2017 A500, ACK Construction rules and regulations 295.1325800.2017 A500, GFRP
Нижнее армирование A500 / Lower reinforcement A500			
Вдоль оси X / Along the X axis	16,4	16,32	20,24
Вдоль оси Y / Along the Y axis	18,05	18,27	22,42
Верхнее армирование A500 / Upper reinforcement A500			
Вдоль оси X / Along the X axis	26,92	–	–
Вдоль оси Y / Along the Y axis	23,29	–	–
Верхнее армирование ACK / Upper reinforcement GFRP			
Вдоль оси X / Along the X axis	–	31,79	40,48
Вдоль оси Y / Along the Y axis	–	27,73	26,57

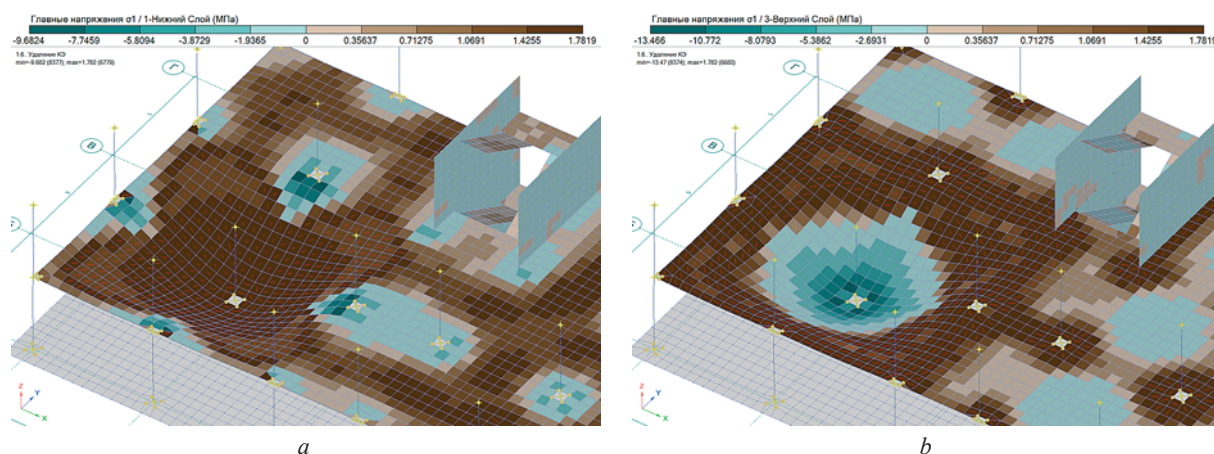


Рис. 12. Мозаики главных напряжений σ_1 в КЭ плиты перекрытия 1-го этажа: *a* — нижний слой; *b* — верхний слой

Fig. 12. Mosaics of the main stresses σ_1 in the FE of the 1st floor slab: *a* — the lower layer; *b* — the upper layer

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Учитывая итоги анализа методик расчета СП 63.13330.2018 и СП 295.1325800.2017, результаты расчета плиты перекрытия и функциональные возможности используемого ПК, можно сделать следующие выводы:

1. Результаты расчета плиты перекрытия с комбинированным армированием по прочности на основное сочетание нагрузок по методикам СП 63.13330.2018 и СП 295.1325800.2017 схожи. Отличие в результатах расчета трещиностойкости плиты по методике СП 295.1325800.2017 от СП 63.13330.2018 связано с различиями в определении момента трещинообразования $M_{ср}$ и базового расстояния между трещинами l_f . Для корректной (нормативной) оценки трещиностойкости опорных сечений плиты, армированных в растянутой зоне композитной арматурой, расчет на основные сочетания нагрузок следует выполнять по методике СП 295.1325800.2017.

2. При расчете на основное сочетание нагрузок максимальная требуемая площадь верхнего армирования АСК по методике СП 295.1325800.2017 составила 23,81 см²/м, что больше требуемой площади 14,44 см²/м стальной арматуры А500 (расчет по методике СП 63.13330.2018) на 39,35 %.

3. При расчете каркаса на устойчивость к прогрессирующему обрушению подбор армирования выполняется только исходя из расчета по прочности. Расчет плиты перекрытия с комбинированным армированием также следовало бы проводить по методике СП 295.1325800.2017. Однако в алгоритме расчета, реализованном в используемом ПК, по этой методике есть «несовершенство»: во всех расчетных сечениях плиты не учитывается продольное армирование в сжатой зоне, т.е. выполняется требование п. 6.1.4 СП 295.1325800.2017 — сопротивление композитной арматуры на сжатие равно нулю. В этой задаче неучет стальной продольной арматуры в сжатой зоне плиты у опор является некорректным. Поэтому для анализа результатов расчета плиты с комбинирован-

ным армированием на прогрессирующее обрушение используются данные по методике СП 63.13330.2018.

4. Максимальная требуемая площадь верхнего армирования АСК при расчете на прогрессирующее обрушение ($K_{дин,П} = 1,444$) по методике СП 63.13330.2018 — 25,73 см²/м, что больше требуемой площади 21,18 см²/м стальной арматуры А500 на 17,68 %, и также превышает требуемую площадь АСК при расчете на основное сочетание нагрузок по методике СП 295.1325800.2017 — 23,81 см²/м на 7,46 %.

5. При расчете на прогрессирующее обрушение ($K_{дин} = 2$, толщина плиты 220 мм) максимальная требуемая площадь верхнего армирования АСК по методике СП 63.13330.2018 составила 31,79 см²/м, что больше требуемой площади 26,92 см²/м стальной арматуры А500 на 15,32 %.

Учитывая приведенные результаты, можно сказать, что предложенное комбинированное армирование плит перекрытий с учетом выполнения расчетов на устойчивость к прогрессирующему обрушению позволяет более эффективно использовать композитную арматуру. Требуемая площадь армирования АСК при расчете на прогрессирующее обрушение превысила требуемую площадь при расчете на основное сочетание нагрузок. При этом, если при расчете на основное сочетание нагрузок площадь верхнего армирования АСК превышала площадь стальной арматуры А500 на 39,35 %, то при расчете на прогрессирующее обрушение разница сократилась до 17,68 и 15,32 % соответственно для расчетов с $K_{дин,П} = 1,444$ и $K_{дин} = 2$.

Следующими этапами данного исследования должны стать определение толщин защитного слоя бетона и стяжки для обеспечения необходимой степени огнестойкости, динамический расчет каркаса с комбинированным армированием в нелинейной постановке.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Baša N., Vuković N.K., Ulićević M., Muhadinović M. Effects of internal force redistribution on the limit states of continuous beams with GFRP reinforcement // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Issue 11. P. 3973. DOI: 10.3390/app10113973. EDN NUSXIC.
2. Ju M., Park Y., Park C. Cracking control comparison in the specifications of serviceability in cracking for FRP reinforced concrete beams // *Composite Structures*. 2017. Vol. 182. Pp. 674–684. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.016
3. Фабричная К.А. Оценка прочности комплексных перемычек из керамзитобетонных блоков // *Вестник гражданских инженеров*. 2023. № 6 (101). С. 31–42. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-6-31-42. EDN BIMNIY.
4. Антаков И.А. Особенности работы изгибаемых элементов с композитной полимерной арматурой под нагрузкой // *Жилищное строительство*. 2018. № 5. С. 15–18. EDN XQKXFB.
5. Мирсаяпов И.Т., Лим В.А., Мирсаяпов А.И., Сулейманов А.М. Оценка эффективности применения высокомодульной полимерной композитной арматуры // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2023. № 3 (65). С. 145–153. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_145. EDN KGTHOV.
6. Мухамедиев Т.А., Зенин С.А., Кудяков К.Л. Исследование прочности внецентренно сжатых бетонных элементов, армированных композитной арматурой // *Бетон и железобетон*. 2024. № 2 (621). С. 13–19. DOI: 10.37538/0005-9889-2024-2(621)-13-19. EDN GRWDHG.
7. Меркулов С.И., Римшин В.И., Акимов Э.К. Огнестойкость бетонных конструкций с композитной стержневой арматурой // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 4. С. 50–55. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.04.50-55. EDN BYRGVY.
8. Зиннуров Т.А., Кормильцев В.С. Теоретические исследования влияния температурного воздействия на работу различных видов арматуры в бетонных конструкциях // *Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура*. 2023. № 4 (4). С. 5–13. EDN LGNGAZ.
9. Мухамедиев Т.А., Кузеванов Д.В. К расчету по прочности изгибаемых конструкций из бетона с композитной полимерной арматурой // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2016. № 4 (267). С. 18–22. EDN WHMCOH.
10. Кудяков К.Л., Бучкин А.В. Особенности проектирования монолитных бетонных фундаментных плит с композитной полимерной арматурой // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. № 6. С. 892–905. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.892-905. EDN KPIJJC.
11. Мирсаяпов И.Т., Антаков И.А., Антаков А.Б. К расчету ширины раскрытия трещин изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 12. С. 1663–1672. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1663-1672. EDN XABHJC.
12. Колчунов В.И., Федорова Н.В., Савин С.Ю., Амелина М.А. Устойчивость внецентренно сжатых железобетонных элементов в особой расчетной ситуации // *Строительные конструкции, здания и сооружения*. 2024. № 4 (9). С. 4–21. EDN IYDOIR.
13. Миронова Ю.В., Сулейманов А.М. Конструктивное решение стыка колонн с перекрытием в сборно-монолитном каркасе для повышения сопротивляемости прогрессирующему разрушению // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2023. № 3 (65). С. 135–144. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_135. EDN JNOUXR.
14. Миронова Ю.В., Люблинский В.А., Малонго Ж.М., Харитонов И.Ф. Напряженно-деформированное состояние петлевого стыка крупнопанельного здания при прогрессирующем обрушении // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2024. № 4 (70). С. 72–82. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.7. EDN ECSCSH.
15. Elkady N., Augusthus Nelson L., Weekes L., Makoond N., Buitrago M. Progressive collapse: Past, present, future and beyond // *Structures*. 2024. Vol. 62. P. 106131. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106131. EDN FYLRWY.
16. Kiakojouri F., De Biagi V., Chiaia B., Sheidaii M.R. Strengthening and retrofitting techniques to mitigate progressive collapse: A critical review and future research agenda // *Engineering Structures*. 2022. Vol. 262. P. 114274. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114274. EDN NAXIZX.
17. Makoond N., Shahnazi G., Buitrago M., Adam J.M. Corner-column failure scenarios in building structures: Current knowledge and future prospects // *Structures*. 2023. Vol. 49. Pp. 958–982. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.01.121. EDN QFSPDN.
18. Alshaikh I.M.H., Bakar B.H.A., Alwesabi E.A.H., Akil H.Md. Experimental investigation of the progressive collapse of reinforced concrete structures : an overview // *Structures*. 2020. Vol. 25. Pp. 881–900. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.03.018. EDN YLAATO.
19. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 173. Pp. 122–149. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.082
20. Миронова Ю.В., Денисов В.В. Напряженно-деформированное состояние сборного железобетонного каркаса при прогрессирующем обрушении // *Строительные конструкции, здания и сооружения*. 2022. № 1 (1). С. 4–12. EDN BLYYSL.
21. Семашкин А.Д., Туснин А.Р., Бергер М.П. Способы расчета несущих конструкций на устойчивость к прогрессирующему разрушению // *Строительство: наука и образование*. 2023. Т. 13. № 2. С. 31–50. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.3. EDN SSKMDG.

22. Kiakojouri F., Zeinali E., Adam J.M., De Biagi V. Experimental studies on the progressive collapse of building structures: A review and discussion on dynamic column removal techniques // *Structures*. 2023. Vol. 57. P. 105059. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105059. EDN DEYPZM.

23. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. About the Problem of Analysis Resistance Bearing Systems in Failure of a Structural Element // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018. Vol. 14. Issue 3. Pp. 103–113. DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-3-103-113. EDN CKYYJV.

Поступила в редакцию 30 сентября 2025 г.

Принята в доработанном виде 16 января 2026 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

О Б А В Т О Р А Х : **Игорь Андреевич Антаков** — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 988840, Scopus: 6602878380, ResearcherID: M-5127-2018, ORCID: 0000-0002-5238-1701; igor788@bk.ru;

Алексей Борисович Антаков — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 260835, Scopus: 57218822925, ORCID: 0000-0001-8712-4134; antakof@mail.ru;

Антон Ринатович Гиздатуллин — кандидат технических наук, главный инженер; **Казанский Инженерный Проект (КазИнжПроект)**; 420015, г. Казань, ул. Жуковского, д. 9; Scopus: 57191525963; antonchiks@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Baša N., Vuković N.K., Ulićević M., Muhadinović M. Effects of internal force redistribution on the limit states of continuous beams with GFRP reinforcement. *Applied Sciences*. 2020; 10(11):3973. DOI: 10.3390/app10113973. EDN NUSXIC

2. Ju M., Park Y., Park C. Cracking control comparison in the specifications of serviceability in cracking for FRP reinforced concrete beams. *Composite Structures*. 2017; 182:674-684. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.016

3. Fabrichnaya K.A. Strength assessment of complex intersections made of expanded clay concrete blocks. *Bulletin of Civil Engineers*. 2023; 6(101):31-42. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-6-31-42. EDN BIMNIY. (rus.).

4. Antakov I.A. Features of behavior of flexural members with composite polymeric reinforcement under load. *Housing Construction*. 2018; 5:15-18. EDN XQKXFB. (rus.).

5. Mirsayapov I.T., Lim V.A., Mirsayapov A.I., Suleymanov A.M. Evaluation of the effectiveness of the use of high-modulus polymer composite reinforcement. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 3(65):145-153. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_145. EDN KGTHOV. (rus.).

6. Mukhamediev T.A., Zenin S.A., Kudyakov K.L. Research of strength of uniaxial compressed concrete elements reinforced with FRP. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2024; 2(621):13-19. DOI: 10.37538/0005-9889-2024-2(621)-13-19. EDN GRWDHG. (rus.).

7. Merkulov S.I., Rimshin V.I., Akimov E.K. Fire resistance of concrete structures with composite rod reinforcement. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 4:50-55. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.04.50-55. EDN BYRGVY. (rus.).

8. Zinnurov T.A., Kormiltsev V.S. Theoretical studies of the effect of temperature action on the operation of various types of reinforcement in concrete structures. *Roads and Transport Infrastructure*. 2023; 4(4):5-13. EDN LGNGAZ. (rus.).

9. Mukhamediev T.A., Kuzevanov D.V. On the calculation of the strength of bent structures made of concrete with composite reinforcement. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2016; 4(267):18-22. EDN WHMCOH. (rus.).

10. Kudyakov K.L., Buchkin A.V. Design of monolithic concrete foundation slabs with FRP reinforcement. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(6):892-905. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.892-905. EDN KIIJJC. (rus.).

11. Mirsayapov I.T., Antakov I.A., Antakov A.B. The analysis of crack width in flexural concrete members reinforced with polymer composite bars. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(12):1663-1672. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1663-1672. EDN XABHJC. (rus.).

12. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Yu., Amelina M.A. Stability of eccentrically compressed reinforced concrete elements in an accidental design

situation. *Construction, Buildings and Structures*. 2024; 4(9):4-21. EDN IYDOIR. (rus.).

13. Mironova Ju.V., Suleymanov A.M. Constructive solution of the joint of columns with the floor slab in a prefabricated-monolithic frame to increase resistance to progressive collapse. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 3(65):135-144. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_135. EDN JNOUXR. (rus.).

14. Mironova Ju.V., Lyublinskiy V.A., Malongo J.M., Kharitonov I.F. Stress-strain state of the loop joint of a large-panel building with progressive collapse. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2024; 4(70):72-82. DOI: 10.48612/News-KSUAE/70.7. EDN ECSCSH. (rus.).

15. Elkady N., Auguthus Nelson L., Weekes L., Makoond N., Buitrago M. Progressive collapse: Past, present, future and beyond. *Structures*. 2024; 62:106131. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106131. EDN FYLRWY.

16. Kiakojouri F., De Biagi V., Chiaia B., Sheidaii M.R. Strengthening and retrofitting techniques to mitigate progressive collapse: A critical review and future research agenda. *Engineering Structures*. 2022; 262:114274. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114274. EDN NAXIZX.

17. Makoond N., Shahnaizi G., Buitrago M., Adam J.M. Corner-column failure scenarios in building structures: Current knowledge and future prospects. *Structures*. 2023; 49:958-982. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.01.121. EDN QFSPDN.

18. Alshaikh I.M.H., Bakar B.H.A., Alwesabi E.A.H., Akil H.Md. Experimental investigation of the progressive collapse of reinforced concrete structures : an overview. *Structures*. 2020; 25:881-900. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.03.018. EDN YLAATO.

19. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*. 2018; 173:122-149. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.082

20. Mironova Yu.V., Denisov V.V. Stress-strain state of precast reinforced concrete frame with progressive collapse. *Construction, buildings and structures*. 2022; 1(1):4-12. EDN BLYYSL. (rus.).

21. Semashkin A.D., Tusnin A.R., Berger M.P. Methods of structural analysis for resistance to progressive collapse. *Construction: Science and Education*. 2023; 13(2):31-50. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.3. EDN SSKMDG. (rus.).

22. Kiakojouri F., Zeinali E., Adam J.M., De Biagi V. Experimental studies on the progressive collapse of building structures: A review and discussion on dynamic column removal techniques. *Structures*. 2023; 57:105059. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105059. EDN DEYPZM.

23. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. About the Problem of Analysis Resistance Bearing Systems in Failure of a Structural Element. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018; 14(3):103-113. DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-3-103-113. EDN CKYYJV.

Received September 30, 2025.

Adopted in revised form on January 16, 2026.

Approved for publication on January 29, 2026.

B I O N O T E S : **Igor A. Antakov** — Candidate of Technical Sciences, senior lector of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RSCI: 988840, Scopus: 6602878380, ResearcherID: M-5127-2018, ORCID: 0000-0002-5238-1701; igor788@bk.ru;

Alexey B. Antakov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RSCI: 260835, Scopus: 57218822925, ORCID: 0000-0001-8712-4134; antakof@mail.ru;

Anton R. Gizdatullin — Candidate of Technical Sciences, chief engineer; **Kazan Engineering Project (KazInzhProject)**; 9 Zhukovskogo st., Kazan, 420015, Russian Federation; Scopus: 57191525963; antonchiks@mail.ru.

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

Конечно-элементные модели термогидромеханического расчета насыпей автомобильных дорог в районах многолетнемерзлых грунтов

Ирина Вадимовна Демьянушко, Валерий Михайлович Стаин,
Илья Анатольевич Карпов, Павел Михайлович Абраменков

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ);
г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Современная практика строительства в районах с многолетнемерзлыми грунтами (ММГ) показывает, что наиболее рациональным принципом возведения оснований для автомобильных дорог (АД) в зоне перспективного развития территорий арктической зоны является сохранение грунтов в мерзлом состоянии (так называемый I принцип проектирования). Это объясняется, прежде всего, экономическими соображениями, так как оттаивание грунтов затратная технология и ее использование в какой-то степени оправдано только в зоне островного залегания вечномерзлых грунтов.

Материалы и методы. Чтобы обеспечить нормативные требования к прочности и деформациям дорожного покрытия в районах ММГ, необходимо выполнить совместный расчет трех физических полей — термического, гидравлического и механического, т.е. термогидромеханический (ТГМ) расчет. Такие расчеты требуются для проектирования и оценки соответствия нормативным требованиям при строительстве дорог в районах вечной мерзлоты. Сейчас на практике применяются отдельные методики расчета теплового состояния дорог на ММГ, после которого используются обычные приемы расчета механики многослойных дорожных конструкций. Для осуществления совместных ТГМ расчетов использовали широко распространенный для расчетов строительных конструкций конечно-элементный (КЭ) программный пакет Plaxis 2D.

Результаты. На основе проведенных исследований разработаны рекомендуемые КЭ модели для совместного ТГМ расчета насыпей АД в районах ММГ. Данные КЭ модели позволяют также изучать поля деформаций и поля скоростей фильтрации воды в процессе размораживания конструкции насыпей — основание.

Выводы. Продемонстрированы возможности разработки КЭ моделей для совместного ТГМ расчета насыпей АД в районах ММГ с помощью пакета программ Plaxis 2D. На конкретных примерах показано, что эти модели позволяют, в частности, определить оптимальную конструкцию насыпи автодороги в районах вечной мерзлоты при наличии ММГ и использовании для термостабилизации теплоизолирующих плит типа XPS в теле насыпи. Проведенные исследования на разработанных КЭ моделях показали, что эти модели позволяют также изучать поля деформаций и поля скоростей фильтрации воды в процессе размораживания конструкции насыпей — основание, что дает возможность проведения исследований различных дорожных конструкций, проектируемых для работы в арктических зонах на ММГ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: арктические зоны, совместный термогидромеханический расчет, метод конечных элементов, замораживание — оттаивание грунта, многолетнемерзлые грунты, теплоизолирующие плиты, насыпи автомобильных дорог, пакет программ Plaxis 2D

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Демьянушко И.В., Стаин В.М., Карпов И.А., Абраменков П.М. Конечно-элементные модели термогидромеханического расчета насыпей автомобильных дорог в районах многолетнемерзлых грунтов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 4. С. 512–527. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.512-527

Автор, ответственный за переписку: Валерий Михайлович Стаин, vamis@yandex.ru.

Finite element models for the thermohydromechanical analysis of road embankments in areas with permafrost soils

Irina V. Demiyanyushko, Valery M. Stain, Ilya A. Karpov, Pavel M. Abramnikov

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Modern construction practice in areas with permafrost soils (PS) shows that the most rational principle for the construction of foundations for highways in the area of prospective development of the territories of the Arctic zone is the preservation of soils in a frozen state (the so-called I design principle). This is primarily due to economic considerations, since soil thawing is a costly technology, and its use is justified to some extent only in the area of island occurrence of permafrost soils.

Materials and methods. In order to meet the regulatory requirements for the strength and deformations of the pavement in the PS areas, it is necessary to perform a joint calculation of three physical fields — thermal, hydraulic and mechanical, that is, to perform a thermohydronechanical (THM) calculation. Such calculations, which are absolutely necessary for the design and assessment of conformity during the construction of roads in permafrost areas. At the same time, only separate methods of calculating the thermal condition of roads at PS are currently used in practice, after which the usual methods of calculating the mechanics of multilayer road structures are further applied. In this paper, the authors used the Plaxis 2D finite element (FE) software package, which is widely used for calculations of building structures, to perform joint THM calculations.

Results. The paper presents the results of the conducted research, on the basis of which recommended FE models have been developed for the joint THM calculation of embankments of highways in the PS areas. Concrete examples show that these models make it possible, in particular, to determine the optimal location in the body of the embankment of the XPS thermal insulation board layers used for thermal insulation. The data from the FE model also make it possible to study the fields of deformations and fields of water filtration rates during the defrosting of the embankment – base structure.

Conclusions. This study shows the possibilities of developing FE models for the joint thermohydronechanical calculation of highway embankments in permafrost areas using the Plaxis 2D software package. Concrete examples show that these models make it possible, in particular, to determine the optimal design of a highway embankment in permafrost areas in the presence of PS when used for thermal stabilization of XPS-type insulating plates in the embankment body. The studies carried out on the developed FE models have shown that these models also make it possible to study the fields of deformations and fields of water filtration rates during the thawing of the embankment – base structure, which makes it possible to conduct research on various road structures designed to operate in the Arctic zones at PS.

KEYWORDS: arctic zones, joint thermohydronechanical calculation, finite element method, freezing – thawing of soil, permafrost soils, thermal insulation plates, embankments of highways, Plaxis 2D software package

FOR CITATION: Demiyanyushko I.V., Stain V.M., Karpov I.A., Abramnikov P.M. Finite element models for the thermohydronechanical analysis of road embankments in areas with permafrost soils. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(4):512-527. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.512-527 (rus.).

Corresponding author: Valery M. Stain, vamis@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В практике проектирования автомобильных дорог (АД) в районах вечной мерзлоты принят так называемый первый принцип проектирования — обеспечение термоизоляции многолетнемерзлых слоев при колебаниях температуры. В настоящее время одним из эффективных методов сохранения мерзлоты в основании дорожной насыпи с температурой не выше $-3,0^{\circ}\text{C}$ на весь период эксплуатации сооружения (рис. 1) является, в частности, устройство теплоизоляционных слоев из экструзивного пенополистирола (XPS) в конструкциях земляного полотна АД на участках распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ)^{1, 2, 3}.

Чтобы обеспечить нормативные требования к прочности и деформациям дорожного покрытия в районах ММГ на этапе проектирования следует выполнить совместный расчет трех физических полей — термического, гидравлического и механи-

ческого, т.е. совместный комплексный термогидромеханический (ТГМ) расчет.

Расчет промерзания и оттаивания грунтов представляет собой сложную геотехническую задачу, требующую одновременного анализа термических, гидрологических и механических характеристик грунтов. Данный факт делает необходимым использование численных методов для углубленного анализа процессов замораживания – оттаивания грунтов, поскольку полевые исследования и лабораторные испытания недостаточно информативны, в первую очередь, из-за их локальности.

Для выполнения ТГМ был применен широко используемый для строительных расчетов конечно-элементный (КЭ) пакет Plaxis 2D⁴. Программный комплекс Plaxis 2D имеет сертификат Госстандарта России, удостоверяющий соответствию осуществляемых с его помощью геотехнических расчетов требованиям нормативных документов. При рассмотрении замораживания – размораживания грунтов применялась модель поведения мерзлого и незамерзшего грунтов, разработанная в Норвежском университете науки и технологий (NTNU) [1], которая доступна в виде пользовательской модели в общей геотехнической программе КЭ Plaxis 2D. Модель NTNU может воспроизводить многие свойства мерзлых грунтов, включая морозное пучение и осадку при оттаивании.

¹ ОДМ 218.2.094–2018. Методические рекомендации по проектированию земляного полотна автомобильных дорог общего пользования из местных талых и мерзлых переувлажненных глинистых и торфяных грунтов в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов. М. : Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2020. 50 с.

² Теплоизоляция дорожных конструкций на многолетнемерзлых грунтах // ПЕНОПЛЭКС. URL: <https://www.penoplex.ru/systems/sistema-teploizolyatsii-na-mnogoletnemerzlykh-gruntakh-mmgi/>

³ Ланько С.В., Бояринцев А.В. Системы термостабилизации вечноммерзлых грунтов. URL: https://vk.com/@geotech_spbgasu-sistema-termostabilizatsii-vechnomerzlykh-gruntov

⁴ Bentley Systems, Inc. PLAXIS 2D 2024.2: Scientific Manual. 2024. URL: https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0108423

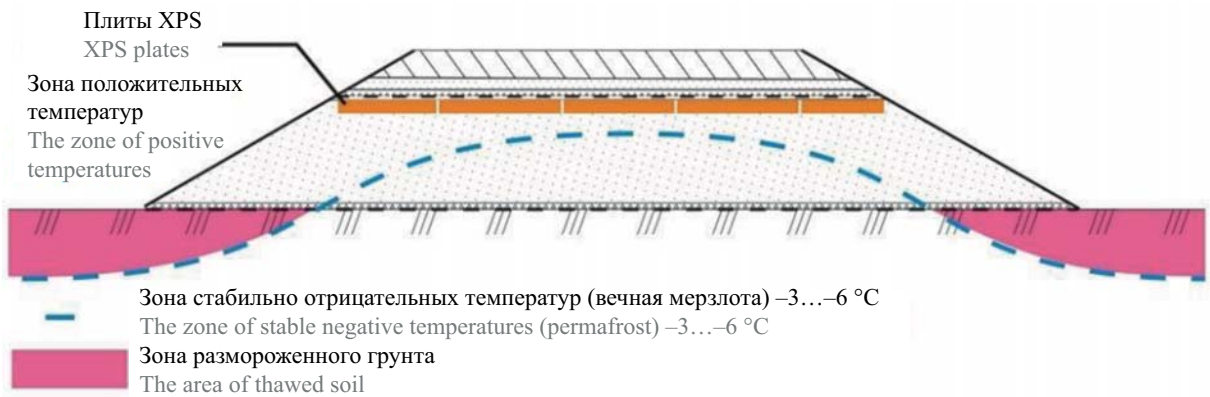


Рис. 1. Положение фронта замороженного грунта в теле насыпи для АД (пунктирная линия) при обеспечении первого принципа проектирования²

Fig. 1. Front position of the frozen ground in the body of the embankment for road (dotted line) under the first design principle²

Подробное описание этой модели, а также методы определения соответствующих ей параметров можно найти в работах⁵ [1–19].

Проблема совместного ТГМ расчета оснований различного вида сооружений в районах ММГ анализировалась также в публикациях [20–39].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

КЭ модели грунтовой насыпи для дорожной насыпи в районах с ММГ. В качестве объекта для КЭ моделирования насыпи использовали типовую расчетную схему, которая приведена в исследованиях по применению термоизолирующих плит XPS⁶ (рис. 2).

⁵ Ghoreishian Amiri S.A., Grimstad G., Aukenthaler M., Panagoulas S., Brinkgreve R.B.J., Haxaire A. The Frozen and Unfrozen Soil Model Manual. Delft : PLAXIS bv (Bentley Systems), 2016. Руководство пользователя UDSM (модель «замороженный/незамороженный грунт») для PLAXIS. URL: https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article_view&sysparm_article=KB0108737

⁶ Моделирование величины оттаивания насыпи для профиля ПК 365+66 (с применением плит ПЕНОПЛЭКС 50 мм, I принцип проектирования) // ПЕНОПЛЭКС.

Создадим КЭ модели для правой половины этой расчетной схемы (рис. 2). Рассмотрим следующие варианты КЭ модели:

- грунтовая насыпь в соответствии с рис. 2 без теплоизолирующих плит XPS;
- грунтовая насыпь с теплоизолирующими плитами XPS, расположенными в соответствии с рис. 2;
- грунтовая насыпь с верхней теплоизолирующей плитой XPS, расположенной в середине высоты насыпи;
- грунтовая насыпь с верхней теплоизолирующей плитой XPS, расположенной на расстоянии 0,5 м от верхней грани насыпи.

Согласно правилам проектирования насыпи АД в районах с ММГ по принципу 1, в данной работе рассматривался только процесс размораживания насыпи и ее основания. При этом температура воздуха изменялась в течение четырех месяцев с мая по август в соответствии с графиком, изображенным на рис. 3.

Для моделирования процесса размораживания грунтов насыпи и основания использовалась упомянутая выше модель NTNU [1].

Начальное распределение температуры в конструкции насыпь – основание для всех четырех перечисленных выше КЭ моделей показано на рис. 4.

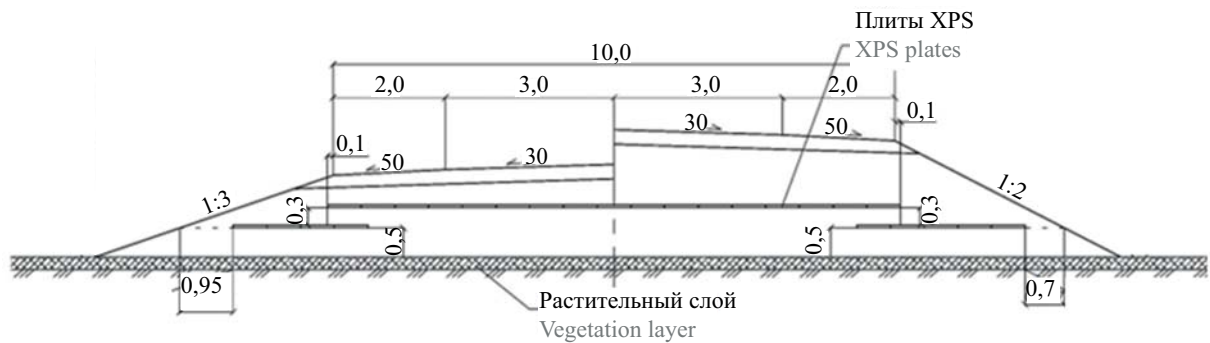


Рис. 2. Расчетная схема насыпи для АД с теплоизолирующими плитами XPS на ММГ⁶

Fig. 2. Calculation diagram of the dam for road with heat-insulating plates XPS on permafrost soil⁶

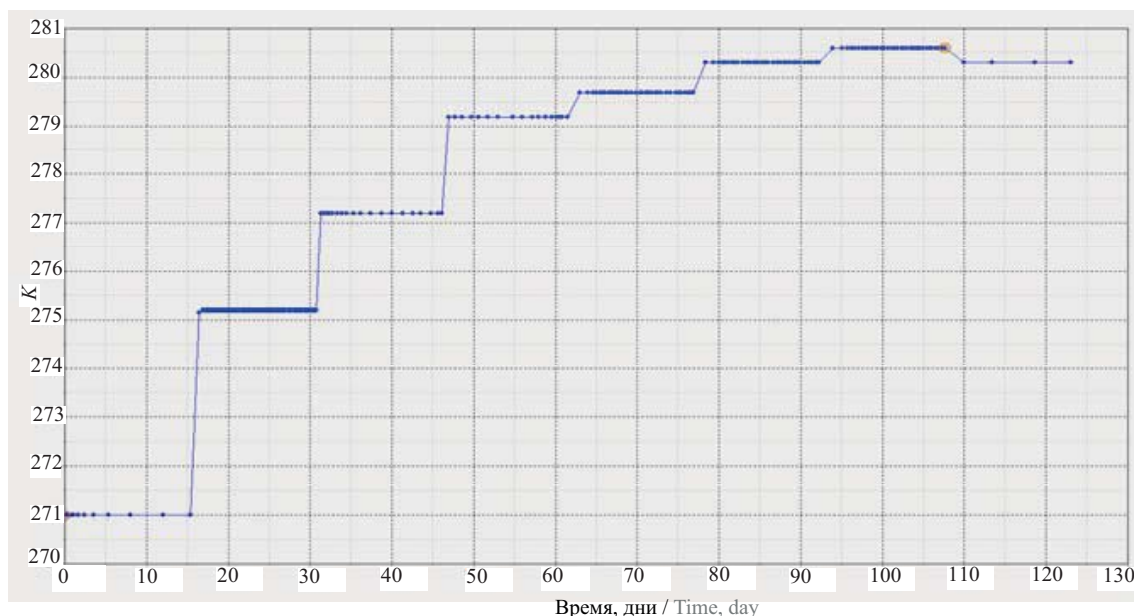


Рис. 3. График изменения температуры воздуха в течение четырех месяцев (май – август)

Fig. 3. Chart of air temperature changes over 4 months (May – August)

Ему соответствует насыщение всех пор грунта полностью замерзшей водой (рис. 5).

КЭ модель грунтовой насыпи по схеме на рис. 2 без теплоизолирующих плит XPS. Размеры модели и ее КЭ сетка показаны на рис. 6.

В результате размораживания конструкции насыпь – основание в течение четырех месяцев в соответствии с графиком изменения температуры воздуха (рис. 3) возникли деформации конструкции, фрагмент которых изображен на рис. 7.

Из рис. 7 следует, что в насыпи появились преимущественно деформации осадки, максимальная величина которых составляет для данной конструкции 6,774 мм. Фрагменты распределения температуры для этого случая показаны на рис. 8, 9.

Из рис. 8 и 9 видно, что изолиния $F = 270$ К ($-3,0$ °С), ниже которой вода в порах грунта полностью заморозена, проходит внутри насыпи на высоте 0,2 м, а ширина области, расположенной ниже этой кривой, равна 4,2 м.

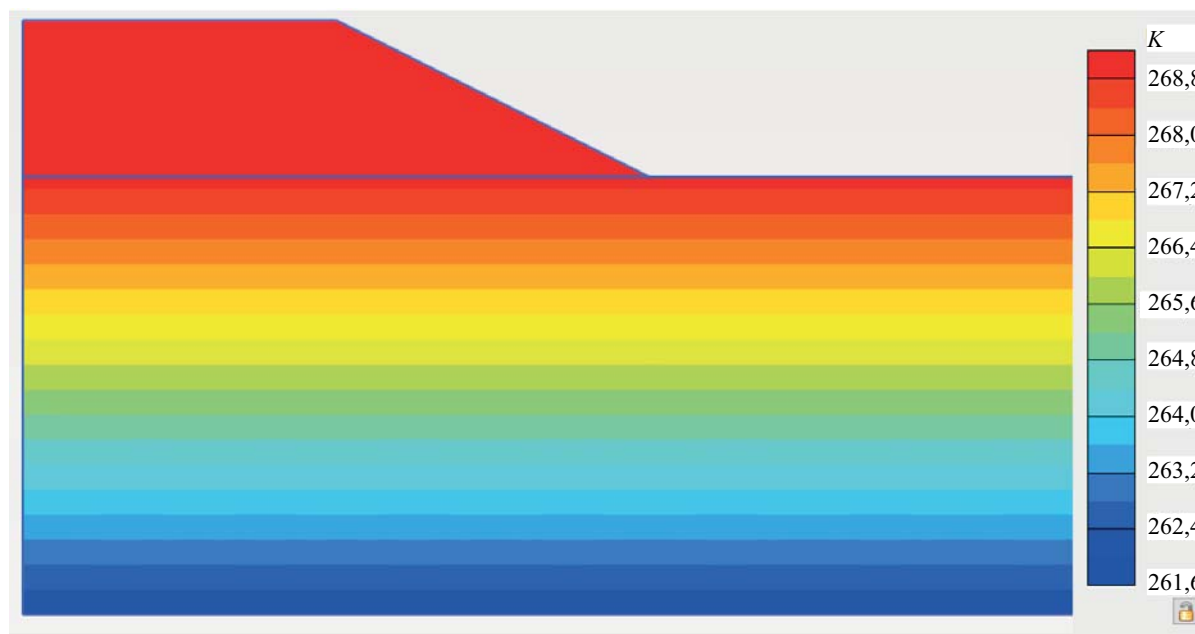


Рис. 4. Распределение температуры в конструкции насыпь – основание в начальный момент времени

Fig. 4. Temperature distribution in the structure of the ground – base at the initial time

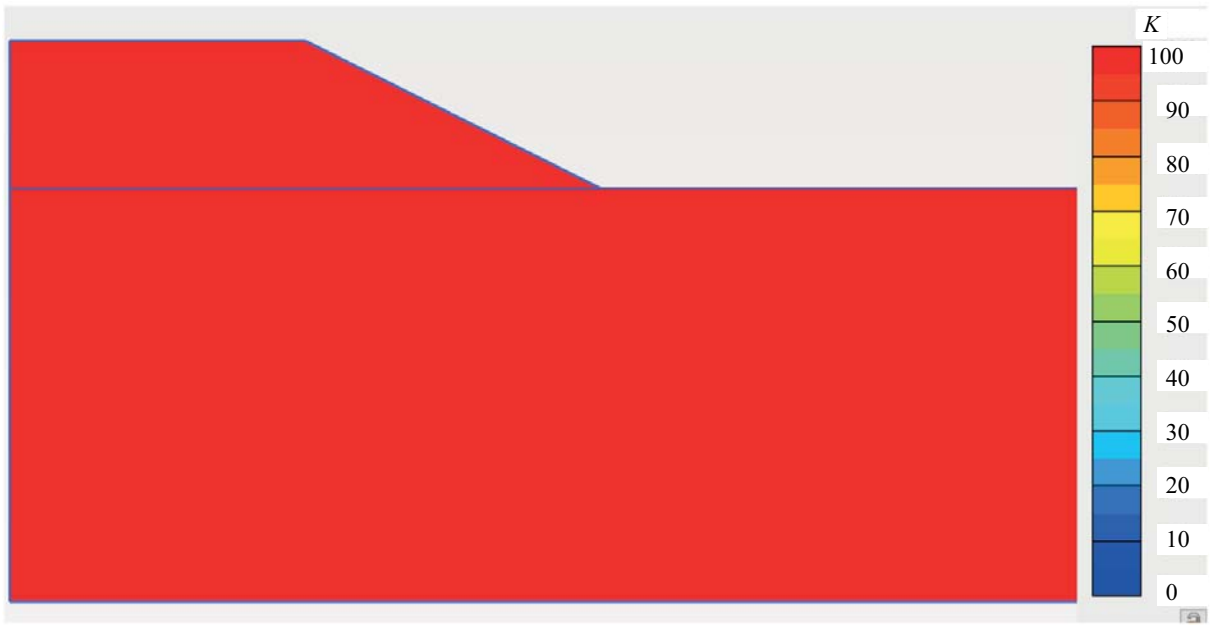


Рис. 5. Распределение насыщения пор грунта полностью замерзшей водой в начальный момент времени

Fig. 5. Distribution of pore saturation of fully frozen water at the initial time

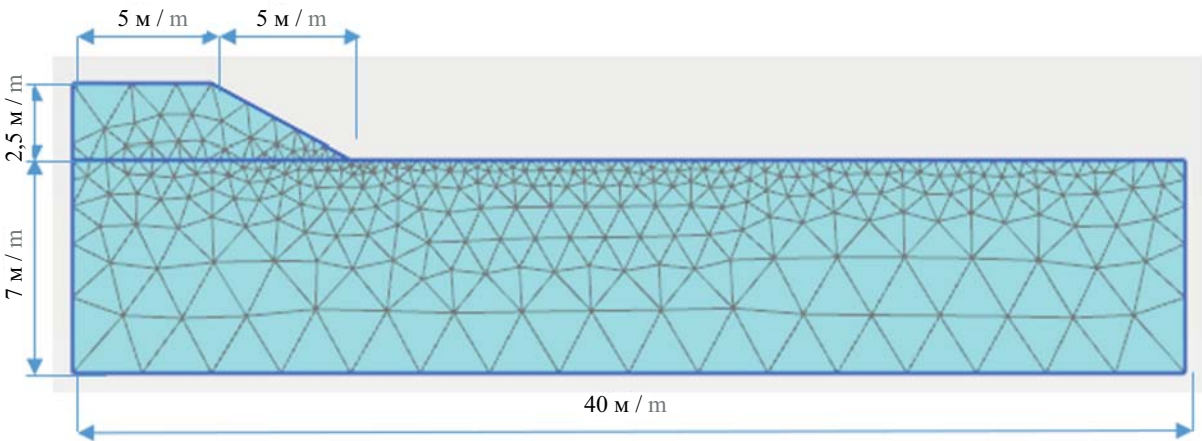


Рис. 6. Размеры и КЭ сетка для насыпи АД без теплоизолирующих плит XPS на ММГ

Fig. 6. Dimensions and FE mesh for road embankment without heat-insulating plates XPS on permafrost soil

С точки зрения желательных размеров зоны стабильно отрицательных температур ($-3...-60^{\circ}\text{C}$), в соответствии с рис. 1, этих размеров явно недостаточно. Очевидно, таким образом, что рассмотренная конструкция насыпи требует использования в ней теплоизолирующих слоев плит XPS.

Грунтовая насыпь с теплоизолирующими плитами XPS, расположенными в соответствии со схемой (рис. 2). КЭ сетка для насыпи АД с теплоизолирующими плитами XPS, расположенными в соответствии с проектом, изображенным на рис. 2, показана на рис. 10.

Проведенные расчеты показали, что в результате размораживания конструкции насыпь-основание в течение четырех месяцев, в соответствии с графиком изменения температуры воздуха (рис. 3), воз-

никли деформации конструкции, фрагмент которых приведен на рис. 11.

Из рис. 11 следует, что в насыпи возникли преимущественно деформации осадки, максимальная величина которых составила 6,635 мм. Фрагменты распределения температуры для этого случая показаны на рис. 12, 13.

Из рис. 12 и 13 видно, что изолиния $F = 270\text{ K}$ ($-3,0^{\circ}\text{C}$), ниже которой вода в порах грунта полностью заморожена, проходит внутри насыпи на высоте 0,83 м, а ширина области, расположенной ниже этой кривой, равна 6,2 м.

С точки зрения желательных размеров зоны стабильно отрицательных температур ($-3...-60^{\circ}\text{C}$) в соответствии с рис. 1 такие размеры можно считать удовлетворительными. В дальнейшем исследо-

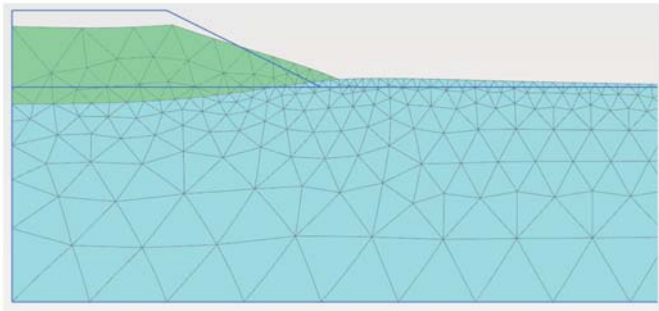


Рис. 7. Фрагмент деформации конструкции насыпь – основание (синие сплошные линии отображают недеформированное состояние конструкции, деформации для наглядности увеличены в 100 раз)
Fig. 7. A deformations fragment of the dam – base construction (blue continuous lines show the unformed state of the structure, the deformations are increased by 100 times for visualization)

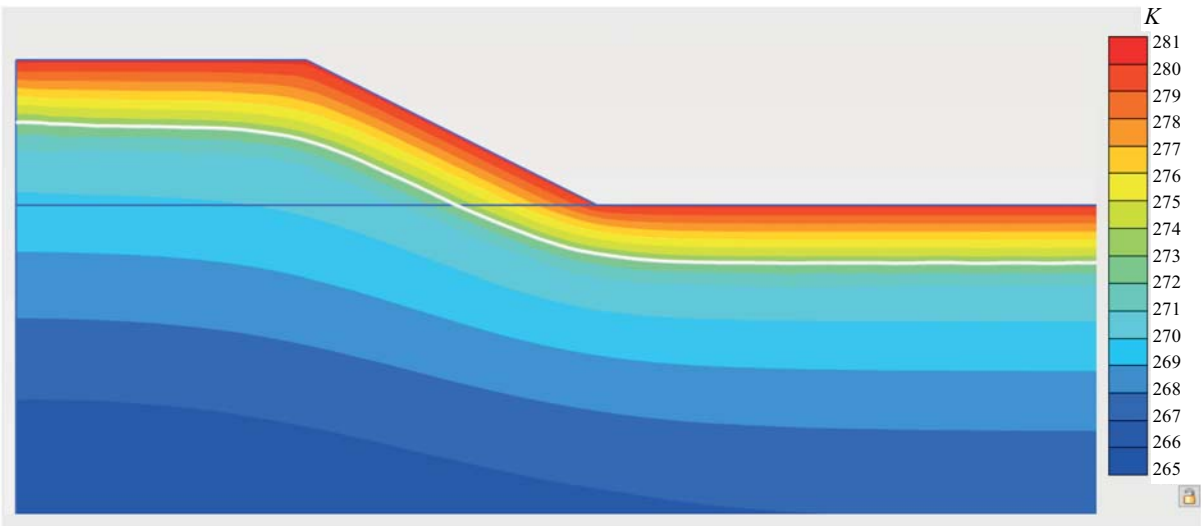


Рис. 8. Фрагмент распределения температуры в конструкции насыпь – основание через 123 дня размораживания
Fig. 8. Fragment of temperature distribution in the dam – base structure after 123 days of defrosting

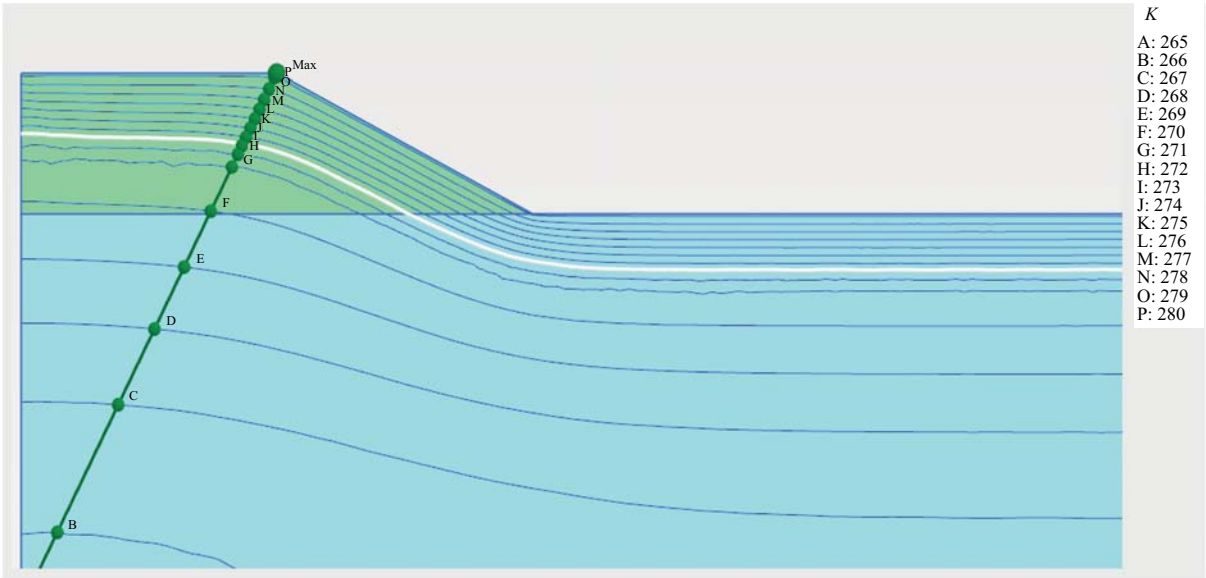


Рис. 9. Изолинии распределения температуры в конструкции насыпь – основание через 123 дня размораживания (белая линия соответствует 0 °С или 273 К)
Fig. 9. Insulation of temperature distribution in the dam – base structure after 123 days of defrosting (white line corresponds to 0 °C or 273 K)

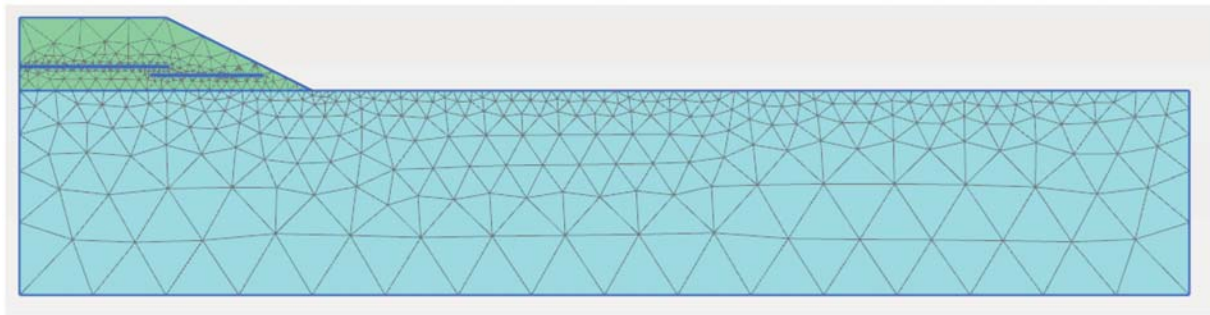


Рис. 10. КЭ сетка для насыпи АД с теплоизолирующими плитами XPS, расположенными в соответствии с проектом, изображенным на рис. 2

Fig. 10. FE road embankment mesh with heat-insulating plates XPS, arranged according to the design shown in Fig. 2

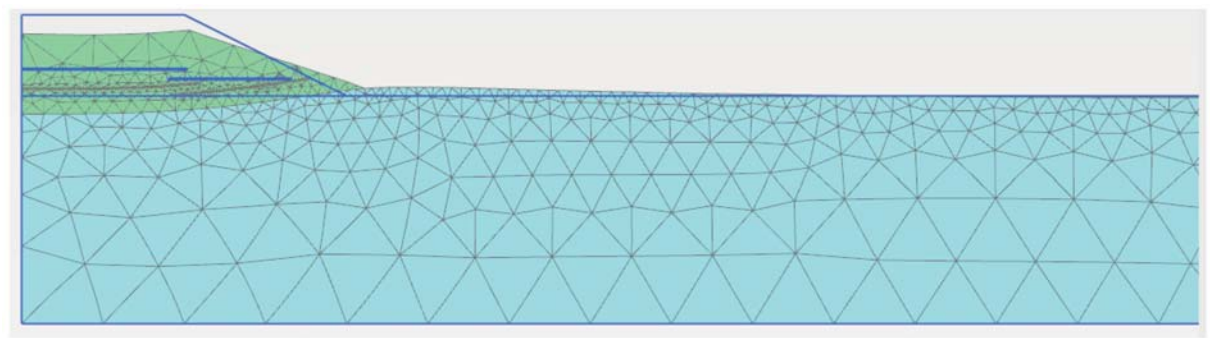


Рис. 11. Фрагмент деформации конструкции насыпь – основание (деформации для наглядности увеличены в 100 раз)

Fig. 11. A section showing the deformation of the dam – base construction (deformations for illustration are increased by 100 times)

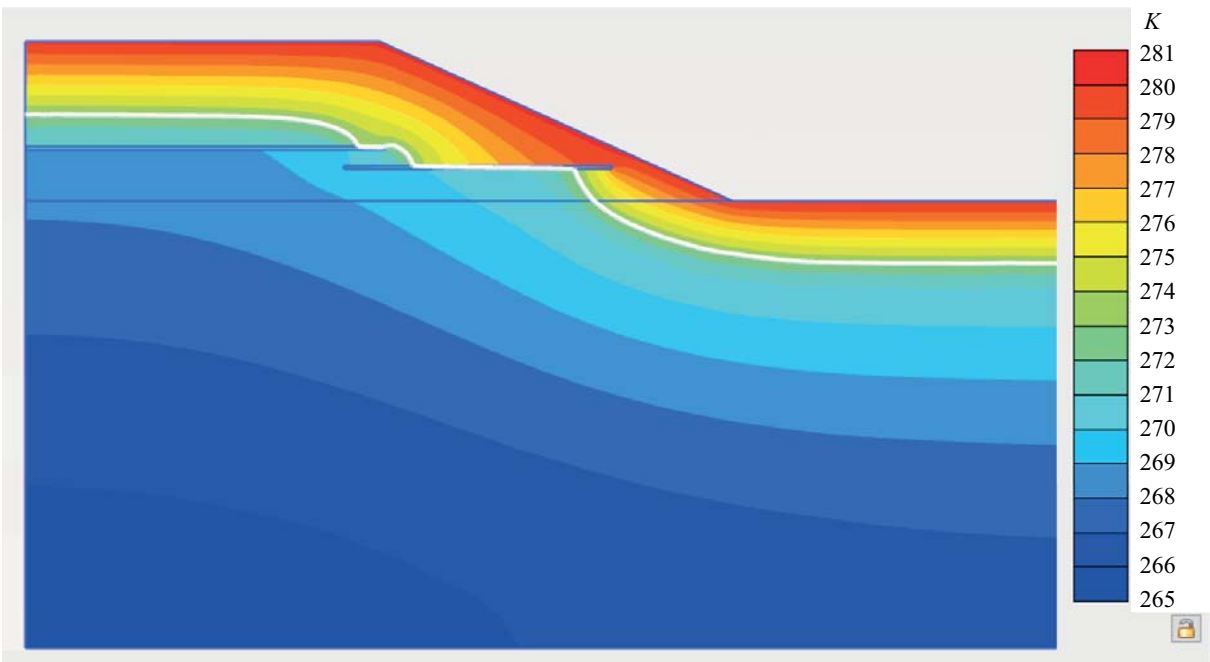


Рис. 12. Фрагмент распределения температуры в конструкции насыпь – основание через 123 дня размораживания

Fig. 12. Fragment of temperature distribution in the dam – base structure after 123 days of defrosting

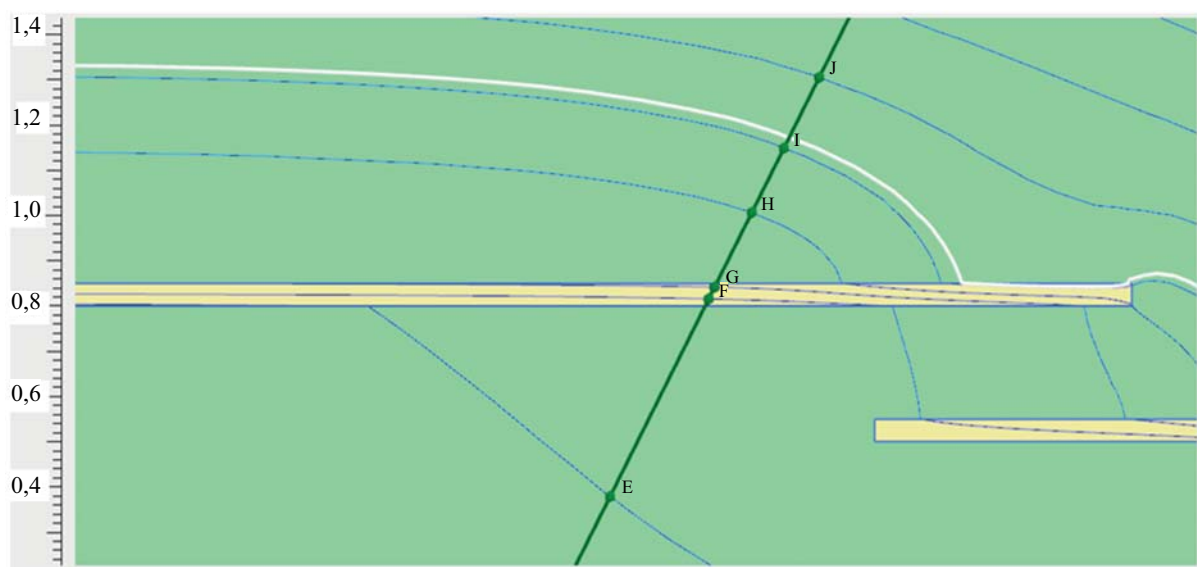


Рис. 13. Изолинии распределения температуры в конструкции насыпь – основание через 123 дня размораживания (белая линия соответствует 0 °C или 273 K)

Fig. 13. Insulation of temperature distribution in the dam – base structure after 123 days of defrosting (white line corresponds to 0 °C or 273 K)

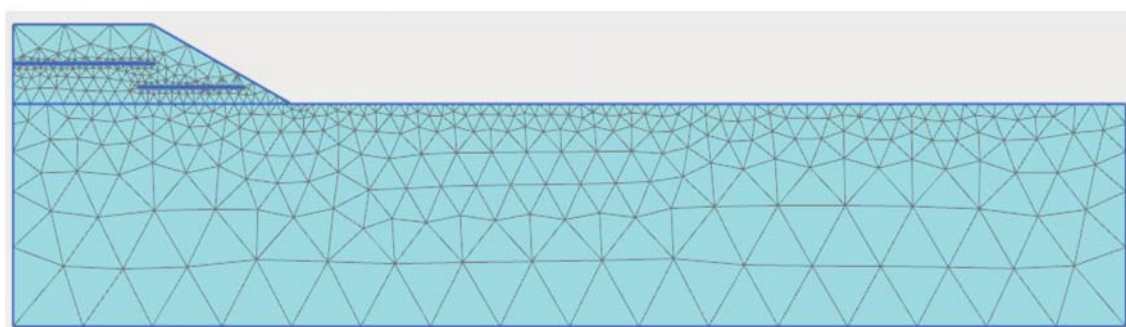


Рис. 14. КЭ сетка для насыпи АД с верхней теплоизолирующей плитой XPS, расположенной в середине высоты насыпи

Fig. 14. FE embankment mesh of the road with top insulation board XPS, located in the middle of the embankment height

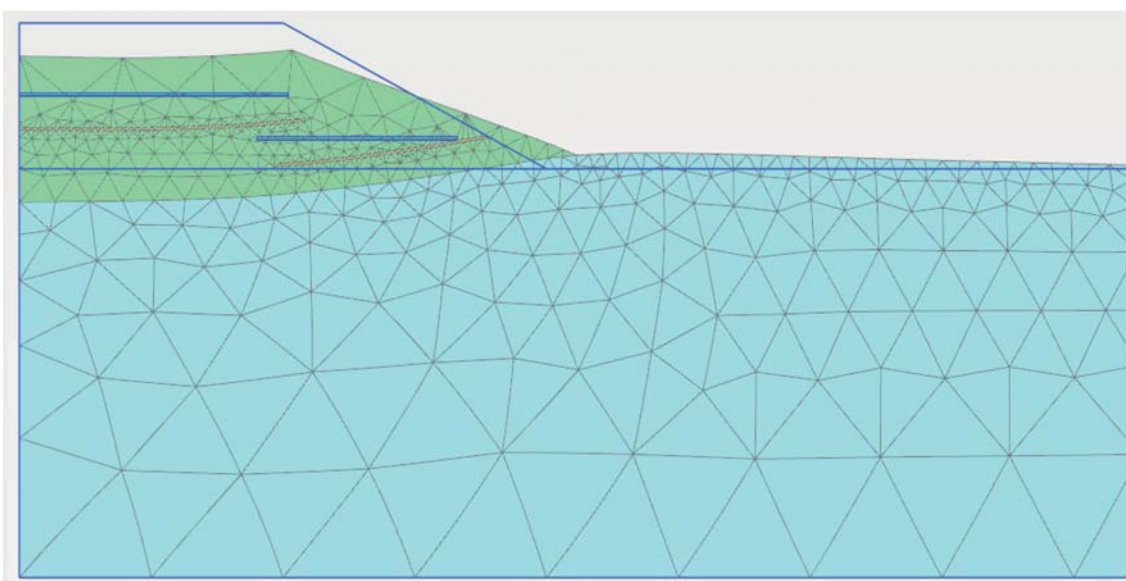


Рис. 15. Фрагмент деформации конструкции насыпь – основание (деформации для наглядности увеличены в 100 раз)

Fig. 15. A section showing the deformation of the dam – base construction (deformations for illustration are increased by 100 times)

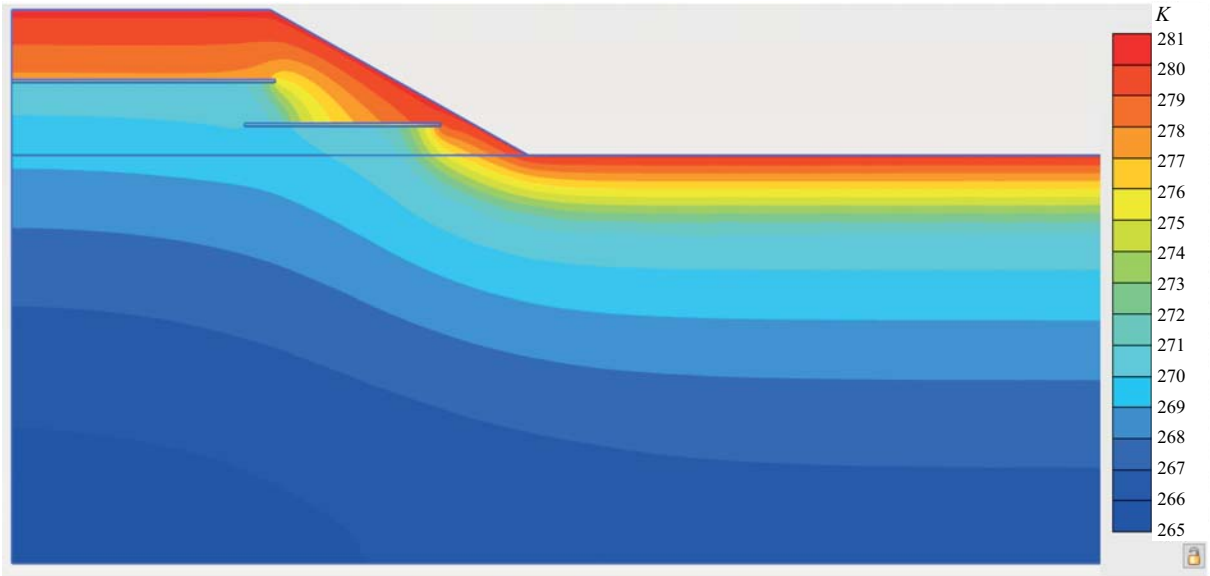


Рис. 16. Фрагмент распределения температуры в конструкции насыпь – основание через 123 дня размораживания

Fig. 16. Fragment of temperature distribution in the dam – base structure after 123 days of defrosting

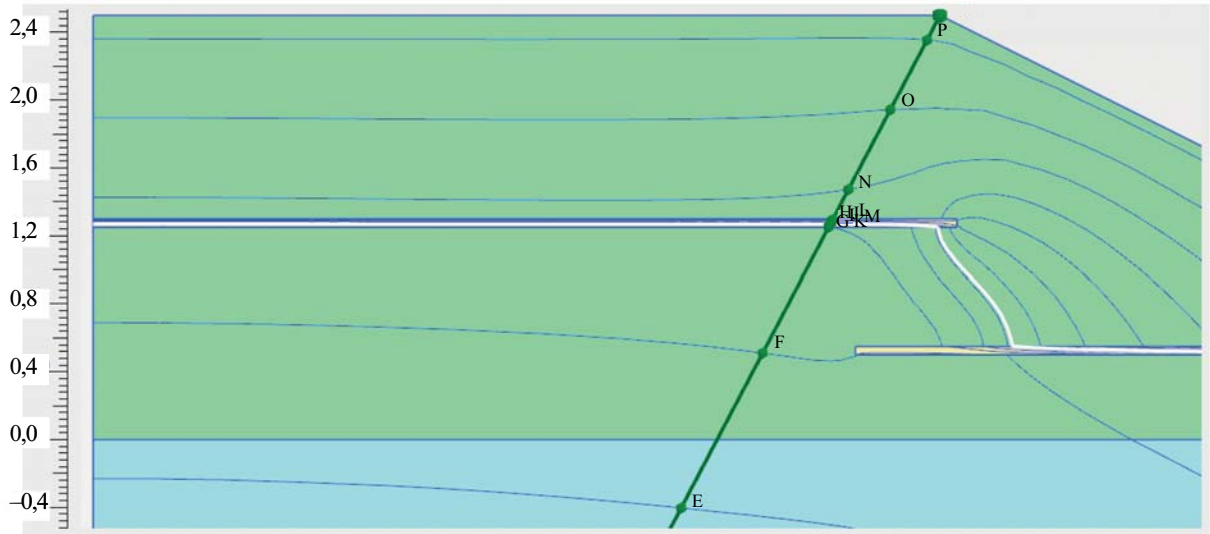


Рис. 17. Изолинии распределения температуры в конструкции насыпь – основание через 123 дня размораживания (белая линия соответствует 0 °С или 273 К)

Fig. 17. Insulation of temperature distribution in the dam – base structure after 123 days of defrosting (white line corresponds to 0 °C or 273 K)

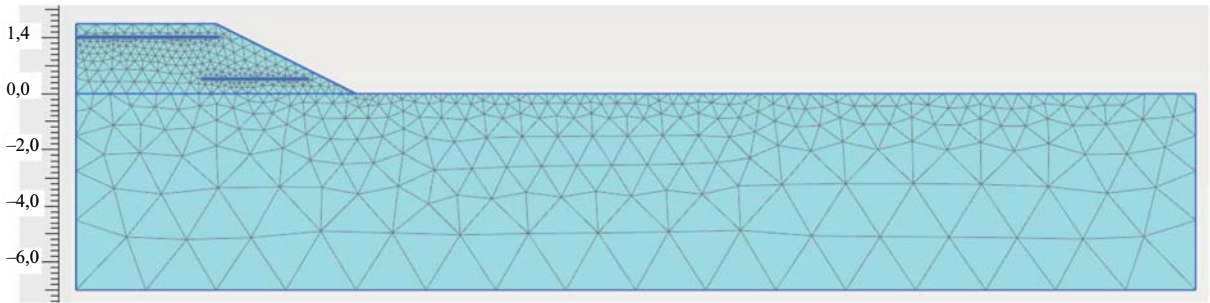


Рис. 18. КЭ сетка для насыпи АД с верхней теплоизолирующей плитой XPS, расположенной на расстоянии 0,5 м от верхней грани насыпи

Fig. 18. FE road embankment Mesh с Top XPS Heat Insulation Board 0.5 m from the top edge of the embankment

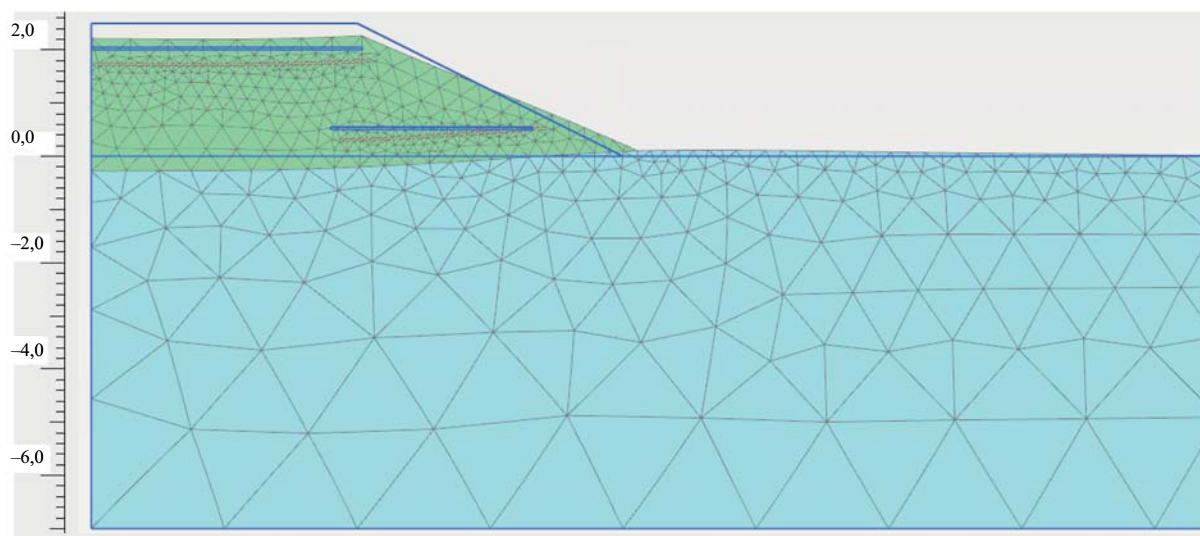


Рис. 19. Фрагмент деформации конструкции насыпь – основание (деформации для наглядности увеличены в 50 раз)

Fig. 19. A section showing deformation of the dam – base construction (deformations for illustration are increased by 50 times)

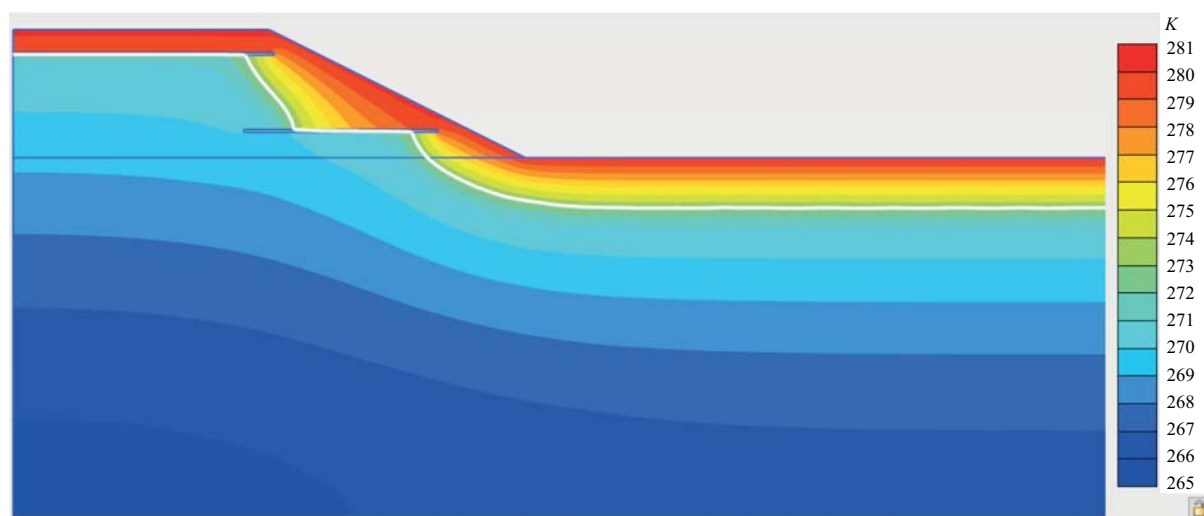


Рис. 20. Фрагмент распределения температуры в конструкции насыпь – основание через 123 дня размораживания

Fig. 20. Fragment of temperature distribution in the dam – base structure after 123 days of defrosting

вании авторы попытались увеличить эффективность рассмотренной теплоизоляции. С этой целью перенесли верхний слой плит XPS в середину высоты насыпи, т.е. на высоту 1,25 м от ее основания.

Грунтовая насыпь с верхней теплоизолирующей плитой XPS, расположенной в середине высоты насыпи. КЭ сетка для насыпи АД с верхней теплоизолирующей плитой XPS, расположенной в середине высоты насыпи, представлена на рис. 14.

В результате размораживания конструкции насыпь – основание в течение четырех месяцев в соответствии с графиком изменения температуры воздуха (рис. 3) появились деформации этой конструкции, фрагмент которых показан на рис. 15.

Из рис. 15 следует, что в насыпи данной конструкции также возникли преимущественно дефор-

мации осадки, максимальная величина которых составляет 6,646 мм.

Фрагменты распределения температуры для этого случая приведены на рис. 16, 17.

Из рис. 16 и 17 видно, что изолиния $F = 270$ K ($-3,0$ °C), ниже которой вода в порах грунта полностью заморозена, проходит внутри насыпи на высоте 0,68 м, а ширина области, расположенной ниже этой кривой, равна 6,2 м.

В этом случае область с полностью замороженным грунтом имеет меньшую высоту при одинаковой ширине, чем в случае расположения верхней плиты XPS в соответствии с проектом (рис. 2). То есть эффективность теплоизоляции при переносе плиты в середину насыпи ухудшилась. Далее авторы попытались увеличить эффективность теплоизоляции,

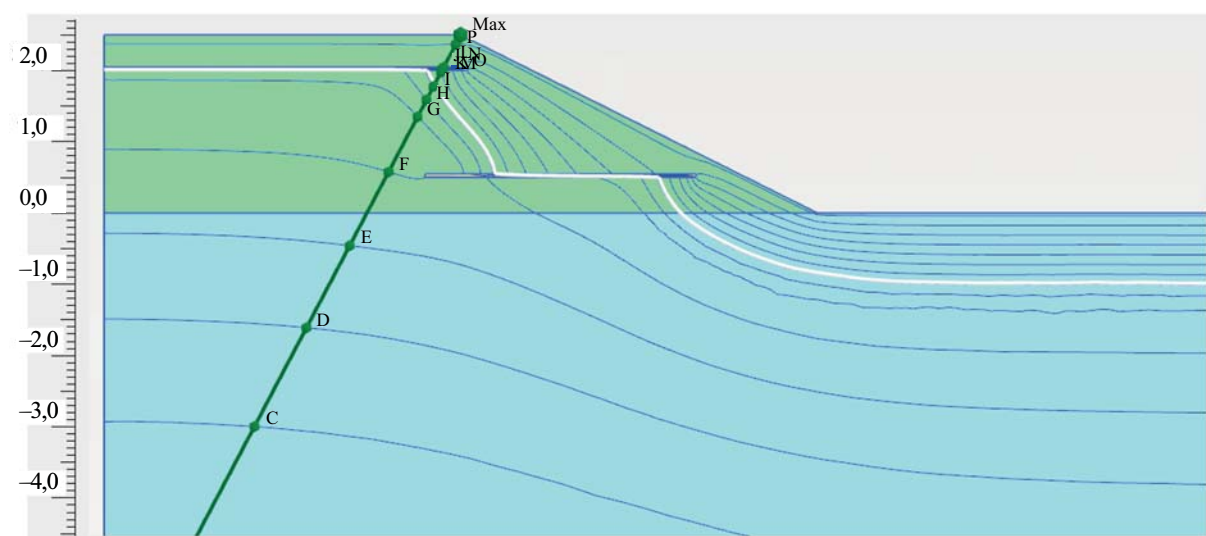


Рис. 21. Изолинии распределения температуры в конструкции насыпь – основание через 123 дня размораживания (белая линия соответствует 0 °C или 273 K)

Fig. 21. Insulation of temperature distribution in the dam – base structure after 123 days of defrosting (white line corresponds to 0 °C or 273 K)

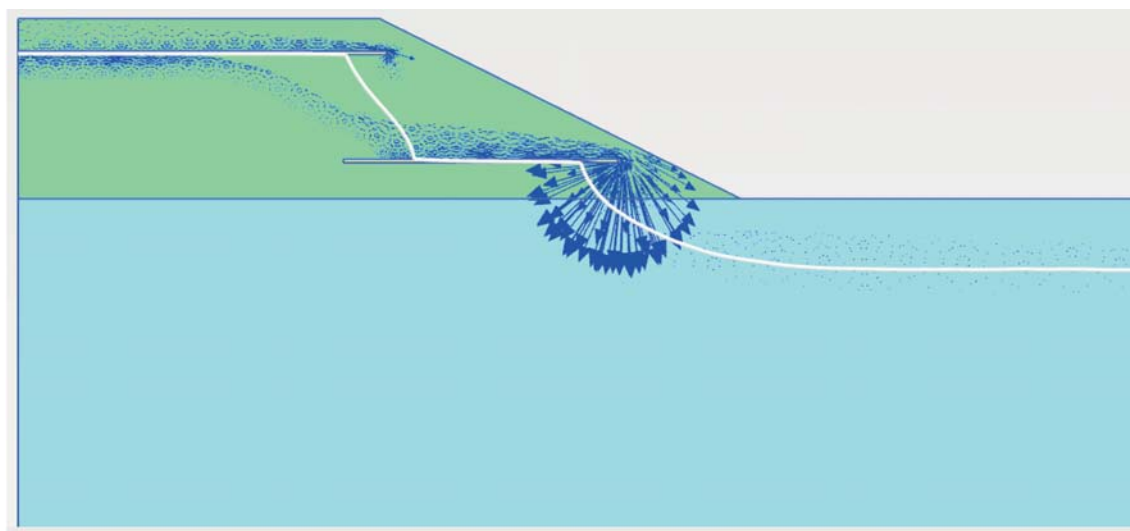


Рис. 22. Поле скоростей фильтрации воды в конце процесса размораживания конструкции насыпь – основание

Fig. 22. The field of water filtration rates at the end of the defrosting process of the embankment – base structure

расположив верхний слой плит XPS на расстоянии 0,5 м от верхней грани насыпи.

Грунтовая насыпь с верхней теплоизолирующей плитой XPS, расположенной на расстоянии 0,5 м от верхней грани насыпи. КЭ сетка для насыпи АД с верхней теплоизолирующей плитой XPS, расположенной на расстоянии 0,5 м от верхней грани насыпи, показана на рис. 18.

В результате размораживания конструкции насыпь – основание в течение четырех месяцев в соответствии с графиком изменения температуры воздуха (рис. 3) возникли деформации конструкции, фрагмент которых изображен на рис. 19.

Из рис. 19 следует, что в насыпи появились преимущественно деформации осадки, максимальная величина которых составляет 6,654 мм. Фрагменты

распределения температуры для этого случая показаны на рис. 20 и 21.

Из рис. 20 и 21 следует, что изолиния $F = 270$ K (-3 °C), ниже которой вода в порах грунта полностью заморозжена, проходит внутри насыпи на высоте 0,9 м, что на 0,07 м больше, чем в проектном решении (рис. 2), а ширина области, расположенной ниже этой кривой, равнялась 6,2 м, что совпадало с проектным решением.

Последний вариант расположения верхней плиты XPS оказался наиболее эффективным с точки зрения сохранения грунта в теле насыпи в замороженном состоянии.

Для демонстрации возможностей разработанных КЭ моделей покажем также (для последнего варианта расположения плит XPS в теле насыпи)

поле скоростей фильтрации воды в конце процесса размораживания конструкции насыпь – основание (рис. 22).

Отметим, что в соответствии с рис. 22 максимальные скорости фильтрации воды возникают на правом конце нижней плиты XPS и составляют 0,282 м/сут.

Определение полей скоростей фильтрации представляет интерес для оценки устойчивости откосов и прогнозирования риска внутренней эрозии грунта (суффозии). Локальные потоки способны вызывать вымывание мелких частиц грунта, что приводит к ослаблению его структуры и может стать причиной неравномерных осадок и снижения общей стабильности сооружения. Таким образом, рассмотренная возможность КЭ моделирования является важным инструментом для проектирования защитных и дренажных мероприятий в конструкции земляного полотна в сложных условиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Представлены результаты проведенных исследований, на основе которых разработаны рекомендуемые КЭ модели для совместного ТГМ расчета насыпей автомобильных дорог в районах ММГ. На конкретных примерах показано, что эти модели позволяют, в частности, определить оптимальное рас-

положение в теле насыпи используемых для термоизоляции слоев ММГ теплоизолирующих плит XPS. Данные КЭ модели дают возможность также изучать поля деформаций и поля скоростей фильтрации воды в процессе размораживания конструкции насыпь – основание.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Показаны возможности разработки КЭ моделей для совместного термогидромеханического расчета насыпей АД в районах многолетнемерзлых грунтов с использованием пакета программ Plaxis 2D.

На конкретных примерах продемонстрировано, что эти модели позволяют, в частности, определить оптимальную конструкцию насыпи автодороги в районах вечной мерзлоты при наличии ММГ и использовании для термостабилизации теплоизолирующих плит типа XPS в теле насыпи.

Проведенные исследования на разработанных КЭ моделях показали, что эти модели позволяют также изучать поля деформаций и поля скоростей фильтрации воды в процессе размораживания конструкции насыпь – основание, что дает возможность выполнения исследований различных дорожных конструкций, проектируемых для работы в арктических зонах на ММГ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Aukenthaler M.* The Frozen & Unfrozen Barcelona Basic Model: A Verification and Validation of a New Constitutive Model : MSc thesis. Delft : Delft University of Technology, 2016.
2. *Ghoreishian Amiri S.A., Grimstad G., Kadiyar M., Nordal S.* Constitutive model for rate-independent behavior of saturated frozen soils // *Canadian Geotechnical Journal*. 2016. Vol. 53. Issue 10. Pp. 1646–1657. DOI: 10.1139/cgj-2015-0467
3. *Aukenthaler M., Brinkgreve R.B.J., Haxaire A.* A practical approach to obtain the soil freezing characteristic curve and the freezing/melting point of a soil-water system // *Proceedings of the GeoVancouver 2016: the 69th Canadian Geotechnical Conference*, Vancouver, Canada. 2016. Pp. 397–404.
4. *Tuohino M., Solowski W., Abed A., Koivisto K., Lei X.* Application of the Frozen and Unfrozen Soil model to modelling effects of freeze-thaw on low-volume roads // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 710. P. 012067. DOI: 10.1088/1755-1315/710/1/012067
5. *Aukenthaler M., Brinkgreve R.B.J.* Application of a Thermo-hydro-mechanical Model for Freezing and Thawing // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 191. Pp. 74–81. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.156
6. *Rostami H.* Finite element analysis of coupled thermo-hydro-mechanical processes in fully saturated, partially frozen soils. 2017. 103 p.
7. *Lyu C., Nishimura S., Ghoreishian Amiri S.A., Zhu F., Eiksund G.R., Grimstad G.* Pore-water pressure development in a frozen saline clay under isotropic loading and undrained shearing // *Acta Geotechnica*. 2021. Vol. 16. Issue 12. Pp. 3831–3847. DOI: 10.1007/s11440-021-01338-y. EDN JDTCNY.
8. *Li K.-Q., Yin Z.-Y.* State of the Art of Coupled Thermo-hydro-Mechanical-Chemical Modelling for Frozen Soils // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2025. Vol. 32. Issue 2. Pp. 1039–1096. DOI: 10.1007/s11831-024-10164-w. EDN XCWVXH.
9. *Nishimura S.* A model for freeze-thaw-induced plastic volume changes in saturated clays // *Soils and Foundations*. 2021. Vol. 61. Issue 4. Pp. 1054–1070. DOI: 10.1016/j.sandf.2021.05.008. EDN XCWVXH.
10. *Lu Y., Liu S., Alonso E., Wang L., Xu L., Li Z.* Volume changes and mechanical degradation of a compacted expansive soil under freeze-thaw cycles // *Cold Regions Science and Technology*. 2019. Vol. 157. Pp. 206–214. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.10.008
11. *Nishimura S., Okajima S., Joshi B.R., Higo Y., Tokoro T.* Volumetric behaviour of clays under freeze-thaw cycles in a mesoscopically uniform element //

Géotechnique. 2021. Vol. 71. Issue 12. Pp. 1150–1164. DOI: 10.1680/jgeot.20.p.047. EDN MZOSD.

12. Zheng H., Kanie S., Akagawa S. A method for obtaining radial stress in the freezing direction in frozen soil samples // Cold Regions Science and Technology. 2020. Vol. 169. P. 102899. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102899. EDN KJCYAL

13. Cui W., Potts D.M., Zdravkovic L., Gawecka K.A., Taborda D.M.G. An alternative coupled thermo-hydro-mechanical finite element formulation for fully saturated soils // Computers and Geotechnics. 2018. Vol. 94. Pp. 22–30. DOI: 10.1016/j.compgeo.2017.08.011

14. Nishimura S., Liang M., Lyu C. Analysis of freezing and thawing processes in clay with freeze-induced compression (FIC) model // Soils and Foundations. 2025. Vol. 65. Issue 1. P. 101559. DOI: 10.1016/j.sandf.2024.101559. EDN RYADWR.

15. Yamazoe N., Tanaka H., Hayashi H., Nishimura S. A rational design approach to peat ground improvement by vertical drains // Soils and Foundations. 2020. Vol. 60. Issue 6. Pp. 1387–1404. DOI: 10.1016/j.sandf.2020.08.009. EDN IXMETU.

16. Nishimura S., Wang J. A simple framework for describing strength of saturated frozen soils as multiphase coupled system // Géotechnique. 2019. Vol. 69. Issue 8. Pp. 659–671. DOI: 10.1680/jgeot.17.p.104

17. Dalla Santa G., Cola S., Secco M., Tateo F., Sassi R., Galgaro A. Multiscale analysis of freeze–thaw effects induced by ground heat exchangers on permeability of silty clays // Géotechnique. 2019. Vol. 69. Issue 2. Pp. 95–105. DOI: 10.1680/jgeot.16.p.313

18. Shastri A., Sánchez M., Gai X., Lee M.Y., Dewers T. Mechanical behavior of frozen soils: Experimental investigation and numerical modeling // Computers and Geotechnics. 2021. Vol. 138. P. 104361. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104361. EDN OTDJFK.

19. Li Q., Zhang D., Li P., Cui K., Jing X. The small-strain stiffness of frozen clay soils at different temperatures and initial water contents: Experimental study and predicted model // Cold Regions Science and Technology. 2023. Vol. 215. P. 103986. DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.103986. EDN WSFZPO.

20. Желнин М.С., Костина А.А., Прохоров А.Е., Плехов О.А., Семин М.А., Агутин К.А. Верификация термогидромеханической модели промерзания влагонасыщенного грунта на основе лабораторных экспериментов // Вычислительная механика сплошных сред. 2021. Т. 14. № 2. С. 144–158. DOI: 10.7242/1999-6691/2021.14.2.12. EDN TJUNGV.

21. Ретина П.И., Сахаров И.И., Фадеев А.Б. Численное моделирование процессов промерзания и пучения в системе «фундамент основание» // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1994. № 5. С. 6–9.

22. Шашкин К.Г. Использование структуры универсального конечного элемента при разработ-

ке моделей в рамках программы «FEM models» // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2000. № 2. С. 26–32.

23. Сахаров И.И., Парамонов М.В. Численная оценка влияния морозного пучения на НДС укрепленных стен котлованов // Численные методы расчетов в практике геотехники : сб. тр. науч.-техн. конф. 2012. С. 159–164.

24. Максимов И.А., Максимова А.Г. Прогноз искусственного оттаивания вечномёрзлых грунтов в основаниях гидротехнических сооружений // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Л. : Энергоатомиздат, 1988. С. 111–118.

25. Kudriavtsev S.A. Numerical investigations of the thermophysical processes in seasonally freezing soils // Kriosfera Zemli. 2003. Vol. 7. Issue 4. Pp. 76–81. EDN MPPZAH.

26. Карлов В.Д. Принципы проектирования фундаментов при использовании в основаниях сооружений сезоннопромерзающих грунтов // Геотехника. Наука и практика : сб. науч. тр. 2000. С. 15–24.

27. Ашпиз Е.С., Вавринюк Т.С. Усиление деформирующихся длительно эксплуатируемых насыпей на многолетнемёрзлом основании // Политранспортные системы : мат. IX Междунар. науч.-техн. конф. 2017. С. 86–90. EDN ZWVQJL.

28. Чжан А.А., Ашпиз Е.С., Хрусталева Л.Н., Шестернев Д.М. Новый способ защиты мерзлых грунтов основания насыпи от оттаивания // Журнал «Путь и путевое хозяйство». 2018. № 1. С. 6–9.

29. Ашпиз Е.С., Хрусталева Л.Н. Предотвращение деградации многолетнемёрзлых грунтов в основании насыпей для условий строительства линии Салехард – Надым // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : тр. XVI Междунар. науч.-техн. конф. Чтения, посвящ. памяти профессора Г.М. Шахунянца. 2019. С. 49–54.

30. Ашпиз Е.С., Вавринюк Т.С. Защитные слои земляного полотна для условий северного широтного хода // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : тр. XVI Междунар. науч.-техн. конф. Чтения, посвящ. памяти профессора Г.М. Шахунянца. 2019. С. 96–99.

31. Ашпиз Е.С. Земляное полотно в условиях многолетнемёрзлых грунтов Северного широтного хода // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 3. С. 22–25. EDN PVTRAW.

32. Пассек В.В., Величко В.П., Герасимов В.А. Тепловое и напряженно-деформированное состояние насыпи в зоне водопропускной трубы на вечной мерзлоте // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 11. С. 8–13. EDN VBCKYL.

33. Пассек В.В., Пасков М.В., Андреев В.С. Возведение насыпей в сложных мерзлотно-грунтовых условиях при наличии погребенных льдов и льдогрунтов заполярной и приполярной тундры // Нефть и газ

Западной Сибири : мат. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения Косухина Анатолия Николаевича. 2015. С. 270–275. EDN UNJFCP.

34. Кудрявцев С.А., Кажарский А.В. Численное моделирование процесса морозного пучения и оттаивания в зависимости от скорости промерзания грунтов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 2 (34). С. 105–110. EDN PCGRPJ.

35. Ланис А.Л., Разуваев Д.А., Усов Д.А. Влияние оттаивания сезонно-мерзлых грунтов на деформации земляного полотна // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3 (58). С. 104–111. DOI: 10.52170/1815-9265_2021_58_104. EDN FKKNWQ.

36. Прохоров А.Е., Желнин М.С., Костина А.А., Плехов О.А. Исследование особенностей неравновесного фазового перехода во флюидонасыщенном грунте // Вестник Пермского университета. Физика. 2018. Т. 4 (42). С. 31–37. DOI: 10.17072/1994-3598-2018-4-31-37. EDN VQRDBQ.

37. Желнин М.С., Прохоров А.Е., Костина А.А., Плехов О.А. Экспериментальное и теоретическое исследование механических деформаций в промерзающем влагонасыщенном грунте // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 4. С. 19–28. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.4.02. EDN UOASYG.

38. Белозеров А.Г., Семенов Е.В., Бабакин Б.С. Математическое моделирование процесса промерзания грунта на основе данных опытных наблюдений // Вестник Международной академии холода. 2021. № 1. С. 102–107. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-102-107. EDN XXTTQU.

39. Трапезников А.Г., Беккер А.Т., Исаева Е.С., Цимбельман Н.Я., Чернова Т.И. Численное моделирование температурного режима грунтовой плотины мерзлого типа Анадырского гидроузла // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 1 (50). С. 81–93. DOI: 10.24866/2227-6858/2022-1/81-93. EDN UFIKXG.

Поступила в редакцию 31 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 11 ноября 2025 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ирина Вадимовна Демьянушко** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительной механики; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 158270, Scopus: 6602540287, ResearcherID: G-5604-2013, ORCID: 0000-0001-6726-1131; demj-ir@mail.ru;

Валерий Михайлович Стаин — кандидат технических наук, профессор кафедры строительной механики; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; SPIN-код: 1052-7044, РИНЦ ID: 968131; vamis@yandex.ru;

Илья Анатольевич Карпов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 971215, Scopus: 57209366542, ResearcherID: AAL-8344-2021, ORCID: 0000-0003-2574-2839; ilya.karpov@outlook.com;

Павел Михайлович Абраменков — аспирант кафедры строительной механики; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 1213802, ResearcherID: OOK-2184-2025, ORCID: 0009-0005-2596-661; Tehb82@bk.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Aukenthaler M. *The Frozen & Unfrozen Barcelona Basic Model: A Verification and Validation of a New Constitutive Model : MSc thesis*. Delft, Delft University of Technology, 2016.

2. Ghoreishian Amiri S.A., Grimstad G., Kadiyar M., Nordal S. Constitutive model for rate-independent behavior of saturated frozen soils. *Canadian Geotechnical Journal*. 2016; 53(10):1646-1657. DOI: 10.1139/cgj-2015-0467

3. Aukenthaler M., Brinkgreve R.B. J., Haxaire A. *A practical approach to obtain the soil freezing characteristic curve and the freezing/melting point of a soil-*

water system. Proceedings of the GeoVancouver 2016: the 69th Canadian Geotechnical Conference, Vancouver, Canada. 2016; 397-404.

4. Tuohino M., Solowski W., Abed A., Koivisto K., Lei X. Application of the Frozen and Unfrozen Soil model to modelling effects of freeze-thaw on low-volume roads. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 710:012067. DOI: 10.1088/1755-1315/710/1/012067

5. Aukenthaler M., Brinkgreve R.B.J. Application of a Thermo-hydro-mechanical Model for Freezing and Thawing. *Procedia Engineering*. 2017; 191:74-81. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.156

6. Rostami H. *Finite element analysis of coupled thermo-hydro-mechanical processes in fully saturated, partially frozen soils*. 2017; 103.
7. Lyu C., Nishimura S., Ghoreishian Amiri S.A., Zhu F., Eiksund G.R., Grimstad G. Pore-water pressure development in a frozen saline clay under isotropic loading and undrained shearing. *Acta Geotechnica*. 2021; 16(12):3831-3847. DOI: 10.1007/s11440-021-01338-y. EDN JDTCNY.
8. Li K.-Q., Yin Z.-Y. State of the Art of Coupled Thermo-hydro-Mechanical-Chemical Modelling for Frozen Soils. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2025; 32(2):1039-1096. DOI: 10.1007/s11831-024-10164-w. EDN XCWVXH.
9. Nishimura S. A model for freeze-thaw-induced plastic volume changes in saturated clays. *Soils and Foundations*. 2021; 61(4):1054-1070. DOI: 10.1016/j.sandf.2021.05.008. EDN XCWVXH.
10. Lu Y., Liu S., Alonso E., Wang L., Xu L., Li Z. Volume changes and mechanical degradation of a compacted expansive soil under freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*. 2019; 157:206-214. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.10.008
11. Nishimura S., Okajima S., Joshi B.R., Higo Y., Tokoro T. Volumetric behaviour of clays under freeze-thaw cycles in a mesoscopically uniform element. *Géotechnique*. 2021; 71(12):1150-1164. DOI: 10.1680/jgeot.20.p.047. EDN MZOSD.
12. Zheng H., Kanie S., Akagawa S. A method for obtaining radial stress in the freezing direction in frozen soil samples. *Cold Regions Science and Technology*. 2020; 169:102899. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102899. EDN KJCYAL.
13. Cui W., Potts D.M., Zdravkovic L., Gawicka K.A., Taborda D.M.G. An alternative coupled thermo-hydro-mechanical finite element formulation for fully saturated soils. *Computers and Geotechnics*. 2018; 94:22-30. DOI: 10.1016/j.compgeo.2017.08.011
14. Nishimura S., Liang M., Lyu C. Analysis of freezing and thawing processes in clay with freeze-induced compression (FIC) model. *Soils and Foundations*. 2025; 65(1):101559. DOI: 10.1016/j.sandf.2024.101559. EDN RYADWR.
15. Yamazoe N., Tanaka H., Hayashi H., Nishimura S. A rational design approach to peat ground improvement by vertical drains. *Soils and Foundations*. 2020; 60(6):1387-1404. DOI: 10.1016/j.sandf.2020.08.009. EDN IXMETU.
16. Nishimura S., Wang J. A simple framework for describing strength of saturated frozen soils as multi-phase coupled system. *Géotechnique*. 2019; 69(8):659-671. DOI: 10.1680/jgeot.17.p.104
17. Dalla Santa G., Cola S., Secco M., Tateo F., Sassi R., Galgaro A. Multiscale analysis of freeze-thaw effects induced by ground heat exchangers on permeability of silty clays. *Géotechnique*. 2019; 69(2):95-105. DOI: 10.1680/jgeot.16.p.313
18. Shastri A., Sánchez M., Gai X., Lee M.Y., Dewers T. Mechanical behavior of frozen soils: Experimental investigation and numerical modeling. *Computers and Geotechnics*. 2021; 138:104361. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104361. EDN OTDJFK.
19. Li Q., Zhang D., Li P., Cui K., Jing X. The small-strain stiffness of frozen clay soils at different temperatures and initial water contents: Experimental study and predicted model. *Cold Regions Science and Technology*. 2023; 215:103986. DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.103986. EDN WSFZPO.
20. Zhelnin M.S., Kostina A.A., Prokhorov A.E., Plekhov O.A., Semin M.A., Agutin K.A. Validation of a thermo-hydro-mechanical model of freezing of water-saturated soil based on laboratory tests results. *Computational Continuum Mechanics*. 2021; 14(2):144-158. DOI: 10.7242/1999-6691/2021.14.2.12. EDN TJUHGv. (rus.).
21. Repina P.I., Sakharov I.I., Fadeev A.B. Numerical modeling of freezing and heaving processes in the foundation-base system. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1994; 5:6-9. (rus.).
22. Shashkin K.G. Using the structure of a universal finite element in the development of models within the framework of the FEM models program. *Urban Reconstruction and Geotechnical Construction*. 2000; 2:26-32. (rus.).
23. Sakharov I.I., Paramonov M.V. Numerical assessment of the effect of frost heaving on the VAT of reinforced walls of excavation pits. *Numerical calculation methods in the practice of geotechnics : proceedings of a scientific and technical conference*. 2012; 159-164. (rus.).
24. Maksimov I.A., Maksimova A.G. Forecast of artificial thawing of permafrost soils in the foundations of hydraulic structures. *Materials of conferences and meetings on hydraulic engineering*. Leningrad, Energoatomizdat, 1988; 111-118. (rus.).
25. Kudriavtsev S.A. Numerical investigations of the thermophysical processes in seasonally freezing soils. *Kriosfera Zemli*. 2003; 7(4):76-81. EDN MPPZAH.
26. Karlov V.D. Principles of foundation design when using seasonally frozen soils in the foundations of structures. *Geotechnics. Science and Practice : Collection of Scientific Papers*. 2000; 15-24. (rus.).
27. Aspiz E.S., Vavrinyuk T.S. Reinforcement of deformable long-term exploited embankments on permafrost. Polytransport systems : proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference. *Siberian State University of Railway Transport*. 2017; 86-90. EDN ZWVQJL. (rus.).
28. Zhang A.A., Aspiz E.S., Khrustalev L.N., Shesternev D.M. A new method of protecting frozen soils at the base of an embankment from thawing. *Path and Track Management Journal*. 2018; 1:6-9. (rus.).
29. Aspiz E.S., Khrustalev L.N. Prevention of degradation of permafrost soils at the base of embankments for the conditions of construction of the Salekhard –

Nadym line. Modern problems of design, construction and operation of the railway track : proceedings of the XVI International Scientific and Technical Conference. *Readings dedicated to the memory of Professor G.M. Shakhunyants*. 2019; 49-54. (rus.).

30. Aspiz E.S., Vavrinyuk T.S. Protective layers of the earthbed for the conditions of the northern latitudinal course. Modern problems of railway track design, construction and operation : proceedings of the XVI International Scientific and Technical Conference. *Readings dedicated to the memory of Professor G.M. Shakhunyants*. 2019; 96-99.

31. Aspiz E. The subgrade in the conditions of permafrost soils of the northern latitudinal line. *Railway Track and Facilities*. 2021; 3:22-25. EDN PVTRAW. (rus.).

32. Passek V.V., Gerasimov V.A. Heat and stress-strain condition of embankment in culvert zone on permafrost. *Railway Track and Facilities*. 2015; 11:8-13. EDN VBCKYL. (rus.).

33. Passek V.V., Paskov M.V., Andreev V.S. The construction of embankments in difficult permafrost-soil conditions in the presence of buried ice and ice soils of the polar and circumpolar tundra. *Oil and Gas of Western Siberia : Proceedings of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 90th anniversary of the birth of Anatoly Nikolaevich Kosukhin*. 2015; 270-275. EDN UNJFCP. (rus.).

34. Kudryavtsev S.A., Kazharskiy A.V. Numerical modeling of freeze heaving and thawing process de-

pending on velocity of soil freezing. *Modern Technologies. System analysis. Modeling*. 2012; 2(34):105-110. EDN PCGRPJ. (rus.).

35. Lanis A.L., Razuvaev D.A., Usov D.A. Influence of thawing soils on the deformation top of subgrade. *Bulletin of the Siberian State University of Railway Communications*. 2021; 3(58):104-111. DOI: 10.52170/1815-9265_2021_58_104. EDN FKKNWQ. (rus.).

36. Prokhorov A.E., Zhelnin M.S., Kostina A.A., Plekhov O.A. Investigation of non-equilibrium phase transition in freezing porous media. *Bulletin of Perm University. Physics*. 2018; 4(42):31-37. DOI: 10.17072/1994-3598-2018-4-31-37. EDN VQRDBQ. (rus.).

37. Zhelnin M.S., Prokhorov A.E., Kostina A.A., Plekhov O.A. Experimental and theoretical study of mechanical deformation of freezing saturated soil. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2019; 4:19-28. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.4.02. EDN UOASYG. (rus.).

38. Belozarov A.G., Semenov E.V., Babakin B.S. Mathematical modelling of soil freezing on the basis of experimental data. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021; 1:102-107. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-102-107. EDN XXTTQU. (rus.).

39. Trapeznikov A.G., Becker A.T., Isaeva E.S., Tsimbelman N.Ya., Chernova T.I. Numerical modeling of the thermal regime of the frozen-type embankment dam of the Anadyr hydrosystem. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022; 1(50):81-93. DOI: 10.24866/2227-6858/2022-1/81-93. EDN UFIKXG. (rus.).

Received October 31, 2025.

Adopted in revised form on November 11, 2025.

Approved for publication on January 29, 2026.

B I O N O T E S: **Irina V. Demiyanyushko** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Structural Mechanics; **Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 158270, Scopus: 6602540287, ResearcherID: G-5604-2013, ORCID: 0000-0001-6726-1131; demj-ir@mail.ru;

Valery M. Stain — Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Structural Mechanics; **Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; SPIN-code: 1052-7044, ID RSCI: 968131; vamis@yandex.ru;

Ilya A. Karpov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Structural Mechanics; **Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 971215, Scopus: 57209366542, ResearcherID: AAL-8344-2021, ORCID: 0000-0003-2574-2839; ilya.karpov@outlook.com;

Pavel M. Abramnikov — postgraduate student of the Department of Structural Mechanics; **Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 1213802, ResearcherID: OOK-2184-2025, ORCID: 0009-0005-2596-661; Tehb82@bk.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

Вероятностное моделирование стальной ферменной конструкции с учетом коррозионной деградации стержневых элементов

Татьяна Анатольевна Мацевич, Савелий Андреевич Данков

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Длительная эксплуатация стальных ферм в агрессивных средах сопровождается коррозионной деградацией стержневых элементов, что приводит к снижению несущей способности и росту вероятности отказа. Детерминированные подходы к оценке ресурса часто дают избыточно консервативные прогнозы и не учитывают случайный характер развития повреждений. Цель исследования — разработка и верификация вероятностной методики оценки состояния и остаточного ресурса стальной ферменной конструкции с учетом пространственно-неоднородной коррозии.

Материалы и методы. Использована конечно-элементная модель типовой фермы в ANSYS Mechanical (элементы SHELL181) с сегментацией стенок профилей для имитации локальной деградации. Коррозионный процесс описан дискретными состояниями поврежденности в рамках марковской модели; переходы между состояниями моделировались по вероятностным законам с применением метода Монте-Карло. Алгоритм реализован специализированным Python-скриптом, интегрированным в расчетный контур ANSYS, с поэтапным обновлением геометрии, регенерацией сетки и пересчетом НДС.

Результаты. Для временного горизонта 70 лет получены: коэффициент запаса прочности 2,8, вероятность отказа менее 10^{-4} и остаточный ресурс более 25 лет. Показано, что учет вероятностной природы переходов и пространственной вариативности коррозии существенно влияет на распределение напряжений и оценки надежности по сравнению с упрощенными детерминированными схемами.

Выводы. Предложенная методика обеспечивает количественно обоснованный прогноз деградации и может применяться для планирования мониторинга, сроков ремонта и мероприятий по обеспечению безопасности стальных ферменных систем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стальная ферменная конструкция, коррозионная деградация, вероятностное моделирование, цепи Маркова, метод Монте-Карло, остаточный ресурс

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мацевич Т.А., Данков С.А. Вероятностное моделирование стальной ферменной конструкции с учетом коррозионной деградации стержневых элементов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 4. С. 528–540. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.528-540

Автор, ответственный за переписку: Савелий Андреевич Данков, olimp.botek@mail.ru.

Probabilistic modelling of a steel truss structure taking into account the corrosion degradation of the rod elements

Tatyana A. Matseevich, Saveliy A. Dankov

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

ABSTRACT

Introduction. Long-term operation of steel trusses in aggressive environments is accompanied by corrosion-induced degradation of the rod elements, which leads to reduced load-bearing capacity and an increased probability of failure. Deterministic approaches to service-life assessment often produce overly conservative predictions and do not account for the stochastic nature of damage evolution. The aim of this study is to develop and verify a probabilistic methodology for assessing the condition and residual service life of a steel truss structure while accounting for spatially heterogeneous corrosion.

Materials and methods. A finite element model of a typical truss was implemented in ANSYS Mechanical (SHELL181 elements), with segmentation of profile walls to simulate local degradation. The corrosion process was represented by discrete damage states within a Markov framework; transitions between states were modeled using probabilistic laws and the Monte Carlo method. The algorithm was implemented as a specialized Python script integrated into the ANSYS computational workflow, with stepwise geometry updates, mesh regeneration, and recalculation of the stress-strain state.

Results. For a 70-year time horizon, the following values were obtained: a safety factor of 2.8, a failure probability below 10^{-4} , and a residual service life exceeding 25 years. It is shown that accounting for the probabilistic nature of state transi-

tions and the spatial variability of corrosion significantly affects stress distribution and reliability estimates compared with simplified deterministic schemes.

Conclusions. The proposed methodology provides a quantitatively substantiated forecast of degradation and can be applied to planning monitoring programs, repair scheduling, and safety assurance measures for steel truss systems.

KEYWORDS: steel truss structure, corrosion deterioration, probabilistic modelling, Markov chains, Monte Carlo method, residual service life

FOR CITATION: Matseevich T.A., Dankov S.A. Probabilistic modelling of a steel truss structure taking into account the corrosion degradation of the rod elements. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(4): 528-540. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.528-540 (rus.).

Corresponding author: Savelyi A. Dankov, olimp.botek@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасной эксплуатации строительных конструкций, значительная часть которых превысила нормативные сроки службы, представляет собой значимую проблему в области безопасности зданий и сооружений [1, 2]. Существующие детерминированные подходы к оценке остаточного ресурса зачастую демонстрируют избыточную консервативность, что приводит к экономически неоптимальным решениям [3].

Актуальность вопроса потери несущей способности элементов зданий и сооружений вследствие коррозии продолжает возрастать особенно для конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах [4–6]. Научные исследования показывают, что важнейшими аспектами обеспечения безопасности строительных объектов являются комплексный мониторинг состояния конструкций и анализ вероятностей отказов [7–9]. Оценка надежности металлических сооружений, работающих в условиях длительной атмосферной коррозии, остается одной из ключевых задач современной строительной механики [10, 11]. В реальных условиях эксплуатации стальные фермы, балки и другие стержневые элементы подвергаются воздействию коррозионных процессов, приводящих к постепенному уменьшению стенок профиля и изменению напряженно-деформированного состояния [12, 13]. Изменение геометрии профиля ведет к снижению несущей способности, увеличению вероятности локального или глобального разрушения и, в конечном итоге, уменьшению срока службы сооружения [14].

В отечественной и зарубежной литературе представлены различные подходы к оценке надежности конструкций в условиях неопределенности [15–17]. Среди них выделяются детерминированные модели, основанные на теории прочности и деформаций, а также вероятностные методы [18]. Последние позволяют учитывать изменчивость эксплуатационных факторов и случайную природу процессов деградации [19]. Особенно важно корректное описание переходных процессов в снижении толщины стенок профиля [20]. Развитие вероятностных методов тесно связано с введением концепции марковских процессов для описания изменения состояния сооружения в течение жизненного цикла (ЖЦ) [21–23]. Марков-

ские цепи с непрерывным временем дают возможность моделировать поэтапный характер деградации, где каждое состояние соответствует определенному уровню повреждения [24]. Такое представление было подробно исследовано в рамках теории надежности [25]. Для моделирования коррозии требуется установить плотности вероятности переходов — функции времени, описывающие интенсивность перехода из состояния i в состояние j [26]. Именно эти функции определяют динамику деградации конструкции и позволяют переходить от качественного описания процесса к количественному прогнозированию остаточного ресурса [27].

В работе [28] изучались переходы между состояниями элементов ферм на основе данных экспериментов коррозионного старения. Было показано, что реальные плотности вероятности переходов можно аппроксимировать распределениями Гумбеля и асимметричными гауссовыми функциями. Однако переходы между состояниями рассматривались как независимые функции.

Цель исследования состоит в апробации методики моделирования коррозионного износа стальных ферменных систем и верификации с ее реализацией в программном комплексе (ПК) ANSYS Mechanical.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для верификации разработанной методологии выбрана типовая стержневая система, применяемая в строительных конструкциях. Универсальный характер выбранной геометрической схемы подтверждается ее адаптивностью к различным конструктивным решениям и способностью функционировать в условиях разнородных напряженных состояний. Это свойство позволяет рассматривать предложенную схему как репрезентативную модель для анализа работы стальных ферменных конструкций общего назначения.

Геометрическое моделирование в среде ANSYS Workbench

Для численной реализации расчетной схемы в ПК ANSYS Mechanical была создана конечно-элементная модель в модуле ANSYS Workbench, предназначенная для квазистатического анализа¹.

¹ В работе использовался ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. ANSYS, Inc., 2021 R2.

Геометрическое построение выполнено в среде SpaceClaim с учетом следующих параметров: конструкция фермы габаритными размерами 4000×1160 мм включает два типа стержневых элементов (рис. 1). Верхний и нижний пояса изготовлены из коробчатого стального профиля $80 \times 60 \times 5$ мм. Элементы решетки (стойки и раскосы) представлены профилем сечением 50×5 мм.

Ключевой особенностью методики является дискретизация каждого профиля на составные элементы. Для моделирования коррозионного повреждения каждая стенка профиля представлена отдельно конечными элементами типа SHELL181 с дополнительным разделением на сегменты длиной 200 мм. Соединение сегментов выполнено с применением технологии Shared Topology, обеспечивающей совместную работу сетки и корректный перенос уси-

лий между элементами (рис. 2). Данный подход позволяет:

- реализовать стохастическое распределение коррозионных повреждений по длине элементов и между отдельными стенками профилей;
- учитывать пространственную неоднородность деградации материала;
- повысить точность определения локальных концентраторов напряжений.

В библиотеке материалов модели задана сталь марки Ст3пс с характеристиками, соответствующими действующим нормативным документам.

Задание граничных условий и нагрузок в ANSYS Workbench

В модуле Model заданы граничные условия и нагрузки. К верхнему поясу фермы приложена распределенная нагрузка $q = 5$ кН/м (рис. 3, а), со-

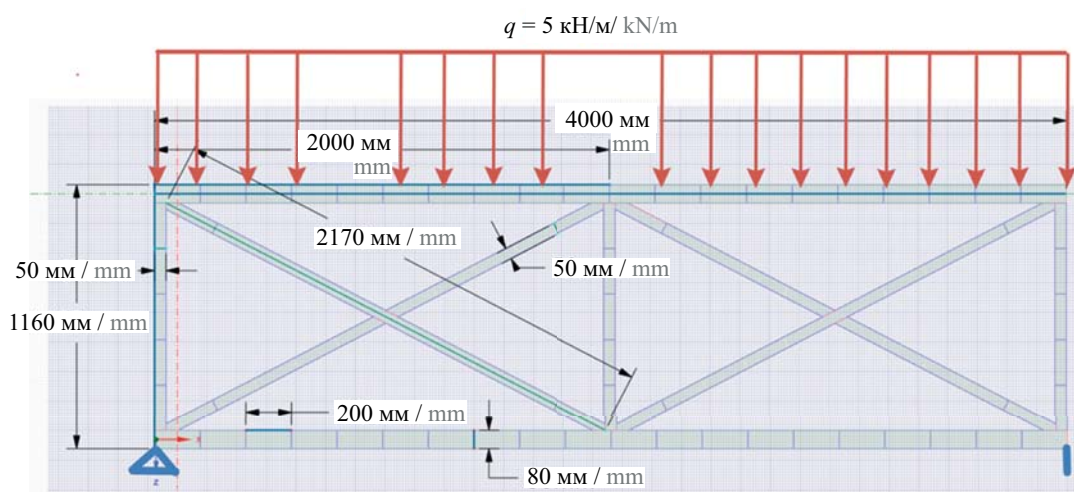


Рис. 1. Схема ферменной конструкции, устройства опирания, приложения нагрузки и геометрических характеристик

Fig. 1. Truss structure layout, support conditions, load application, and geometric parameters

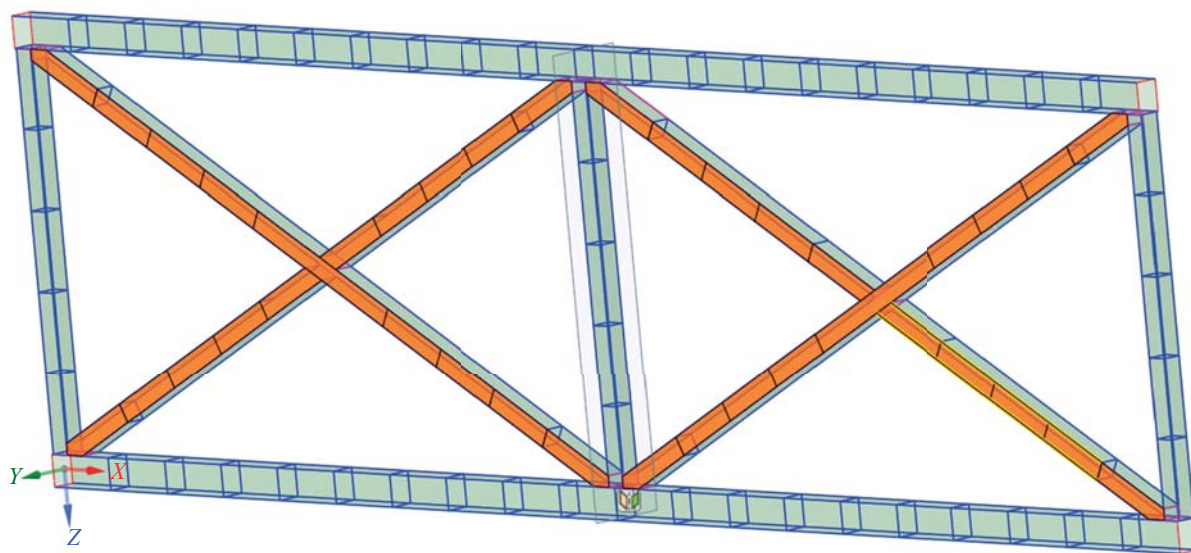


Рис. 2. Пространственная схема ферменной конструкции, визуализация сегментации профилей

Fig. 2. Spatial model of the truss structure and visualization of cross-section segmentation

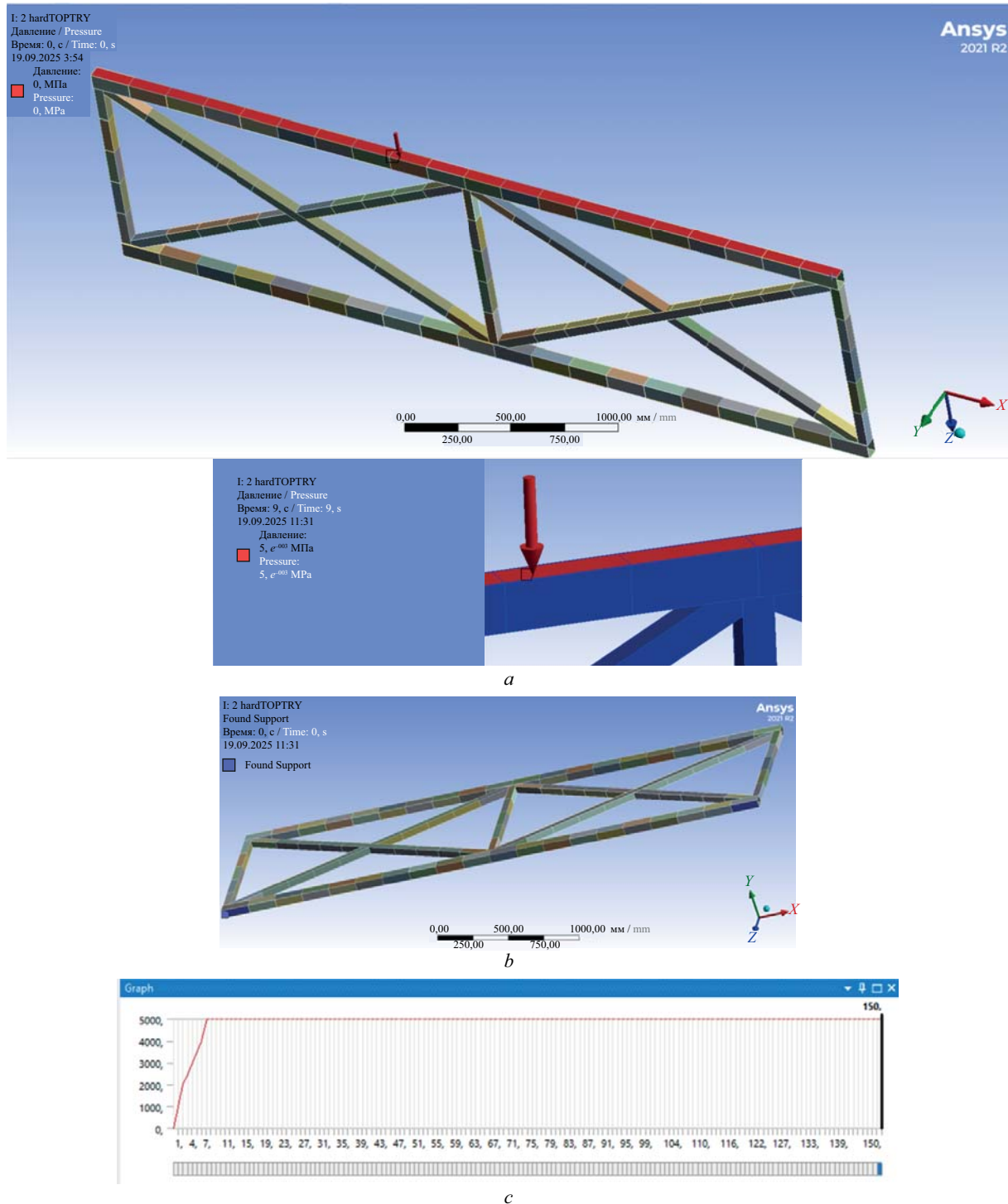


Рис. 3. Схема: *a* — приложения распределенной нагрузки $q = 5$ кН/м на верхний пояс фермы; *b* — закрепления ферменной конструкции по сегментам, лежащим на опорах; *c* — график приложения нагрузки по времени к верхнему поясу ферменной конструкции

Fig. 3. Application scheme: *a* — of the distributed load $q = 5$ кН/м on the top chord of the truss; *b* — boundary conditions of the truss structure by segments resting on the supports; *c* — load application over time to the top chord of the truss structure

ответствующая нормативным эксплуатационным и снеговым нагрузкам². Нагрузка собрана как погонная при шаге ферм, равном 6 м.

² СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*. М., 2016. 104 с.

Для прогонных ферм следует применять схемы, учитывающие возможность температурных деформаций и соответствующие реальным конструктивным решениям опорных узлов. Заданы граничные условия, соответствующие комбинированному закреплению. Одна опора $U_{xyz} = 0$ (условно непод-

вижная), вторая опора $U_y = 0$ (подвижная в горизонтальном направлении) (рис. 3, b).

С целью исключения влияния инерционных сил нагружение задавалось интервально, постепенно увеличиваясь до максимального значения с последующим его сохранением (рис. 3, c).

Параметры дискретизации конечно-элементной модели

Для дискретизации геометрической модели использован автоматизированный алгоритм построения сетки. Принято решение об отказе от локального сгущения сетки, поскольку все участки стержневых элементов обладают равной значимостью с точки зрения анализа коррозионной деградации.

- Основные параметры генерации сетки:
- базовый размер элементов принят по умолчанию для автоматического алгоритма;
 - коэффициент роста размера ячеек 1,1, что обеспечивает плавное изменение размеров смежных элементов.

Тип элементов выбран SHELL181 для тонкостенных профилей.

Результаты контроля качества сетки демонстрируют, что большинство элементов (свыше 95 %) имеют показатель качества выше 0,9 по стандартной метрике ANSYS, что соответствует требованиям для точного статического анализа. Общее количество элементов в модели составило 19 091, что обеспечи-

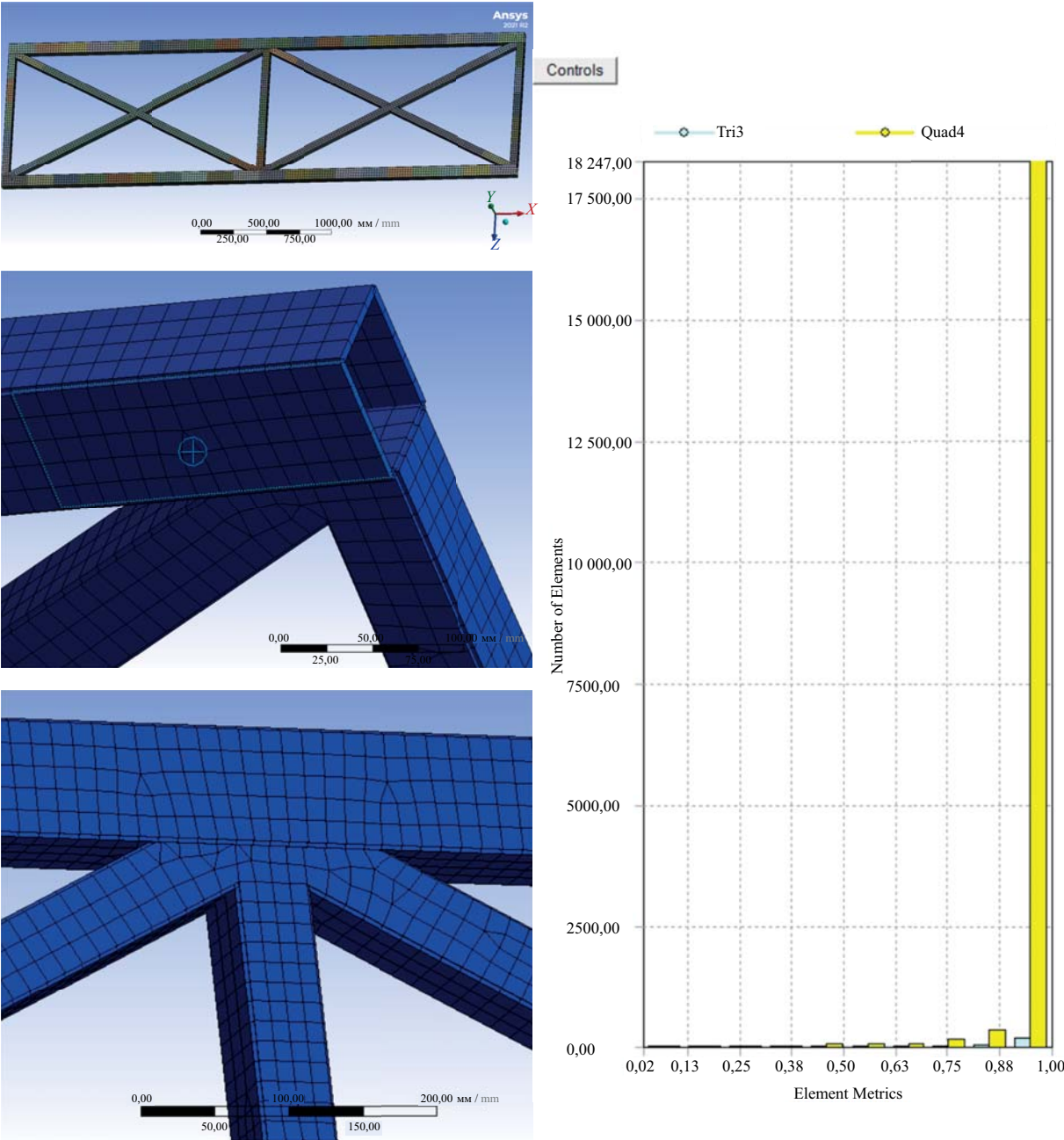


Рис. 4. Визуализация сеточной дискретизации и ее качества

Fig. 4. Visualization of mesh discretization and mesh quality

вает баланс между вычислительной эффективностью и точностью определения локальных напряжений в зонах потенциальной коррозии. Равномерное распределение элементов по всей поверхности профилей позволяет корректно моделировать стохастический характер коррозионных повреждений (рис. 4).

Параметры временного интегрирования в квазистатическом анализе

При проведении квазистатического расчета с учетом длительного коррозионного воздействия временные параметры задания нагрузки структурированы следующим образом. В соответствии с экспериментальными данными о кинетике коррозионных процессов в строительных конструкциях, а также на основании исследований остаточного ресурса стальных сооружений принят расчетный период эксплуатации 150 лет и 12 подшагов в пределах каждого основного шага, моделирующих месячные колебания нагрузочных и коррозионных воздействий. Этот интервал принят, чтобы в его пределах выход конструкции из строя реализовался с высокой долей вероятности. Такая детализация временной разбивки позволяет адекватно воспроизвести кумулятивный характер коррозионной деградации материала и ее влияние на несущую способность конструктивной системы в течение всего ЖЦ.

Численное моделирование (вероятностный подход к моделированию коррозии)

С целью построения вероятностной модели коррозионной деградации за основу был взят аппарат, разработанный в работе [18], который дает возможность перейти от детерминированного описания к стохастическому прогнозированию.

В основе модели лежит кинетика коррозионного процесса, описываемая степенной зависимостью:

$$C_{(t)} = At^B, \quad (1)$$

где $C_{(t)}$ — концентрация продуктов коррозии или глубина проникновения; A и B — эмпирические коэффициенты, определяющие агрессивность среды и свойства материала.

Для перехода к механическим характеристикам используется модель инициации коррозии (на основе диффузии хлоридов):

$$t_{\text{ин}} = \frac{x^2}{4D \left(\operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C_{\text{cr}}}{C_0} \right) \right)^2}, \quad (2)$$

где x — глубина коррозии; D — коэффициент диффузии хлоридов; erfc^{-1} — функция ошибок Гаусса [29]; C_{cr} — критическая концентрация хлоридов; C_0 — поверхностная концентрация хлоридов.

Рассмотрим стержни коромыслового сечения $80 \times 60 \times 5$ и 50×5 . Тогда исходная площадь для прямоугольного замкнутого профиля с внешними размерами b (ширина) и h (высота), толщиной стенки s :

$$A_0 = 2s(b + h - 2s). \quad (3)$$

Поперечное сечение элементов описывается как временная функция:

$$A_{(t)} = 2 \begin{cases} s(b + h - 2s) & (\text{коррозия не началась}); \\ s - v(t - t_{\text{ин}})[b + h - 2(s - v(t - t_{\text{ин}}))] & \end{cases} \quad (4)$$

где $A_{(t)}$ — площадь поперечного сечения в момент времени t , мм²; s — начальная толщина стенки, мм; b, h — геометрические размеры коромыслового профиля, мм; v — скорость коррозии, мм/год; $t_{\text{ин}}$ — время начала коррозии (мес).

В таблице приведена классификация дискретных коррозионных состояний. Выделяют 6 стадий — от нового элемента до потери несущей способности, каждая из которых характеризуется процентом потери сечения.

Классификация стадий коррозии

Corrosion stage classification

Стадии коррозии Corrosion stage	Состояние Status	Коэффициент коррозии, % Corrosion loss (cross-section loss), %
S_1	Не коррозионная No corrosion	0
S_2	Незначительная коррозия Minor corrosion	(0, 1]
S_3	Умеренная коррозия Moderate corrosion	(1, 3]
S_4	Сильная коррозия Severe corrosion	(3, 8]
S_5	Усиленная коррозия Enhanced corrosion	(8, 15]
S_6	Потеря несущей способности Loss of load-bearing capacity	>15

Сформируем граф коррозионных состояний и матрицу вероятностей переходных состояний между ними:

$$P_{corr}(nT_k) = \begin{bmatrix} p_{corr(1,1)}(nT_k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{corr(1,2)}(nT_k) & p_{corr(2,2)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{corr(1,3)}(nT_k) & p_{corr(2,3)} & p_{corr(3,3)} & 0 & 0 & 0 \\ p_{corr(1,4)}(nT_k) & p_{corr(2,4)} & p_{corr(3,4)} & p_{corr(4,4)} & 0 & 0 \\ p_{corr(1,5)}(nT_k) & p_{corr(2,5)} & p_{corr(3,5)} & p_{corr(4,5)} & p_{corr(5,5)} & 0 \\ p_{corr(1,6)}(nT_k) & p_{corr(2,6)} & p_{corr(3,6)} & p_{corr(4,6)} & p_{corr(5,6)} & p_{corr(6,6)} \end{bmatrix}.$$

(5)

Заметим, что:

$$\sum_{\forall \beta} p_{corr(\alpha,\beta)} = 1.$$

(6)

Матрица (5) является математическим ядром цепи Маркова. Ее элементы $p_{corr(i,j)}$ определяют вероятность перехода элемента из состояния i в состояние j за один временной шаг. Нулевые вероятности над диагональю отражают необратимость процесса коррозии (переход в лучшее состояние или ремонт не рассматриваются). Важно, что данная матрица не числовая, а функциональная. Значения матрицы определяются в конкретный момент времени. Все это служит прямой математической основой для реализации метода Монте-Карло и последующего перехода к цепям Маркова, что позволяет прогнозировать надежность конструкции в условиях неопределенности.

Проведен поиск пригодных описательных моделей для исходных данных. Для определения вероятностей переходных состояний изначально подбирались математические распределения, которые наиболее точно описывали бы распределения, принятые в исследовании [26]. Оценкой качества выступал коэффициент детерминации. Физическая интерпретация основана на концепции коррозионного процесса как последовательности дискретных переходов между состояниями с различной степенью повреждения. Каждый переход представляет собой акт ускоренной потери сечения, механизм которого качественно аналогичен на всех стадиях деградации,

но реализуется в условиях различного начального состояния материала и остаточной несущей способности [28].

Вероятностное моделирование деградации единичного стержня

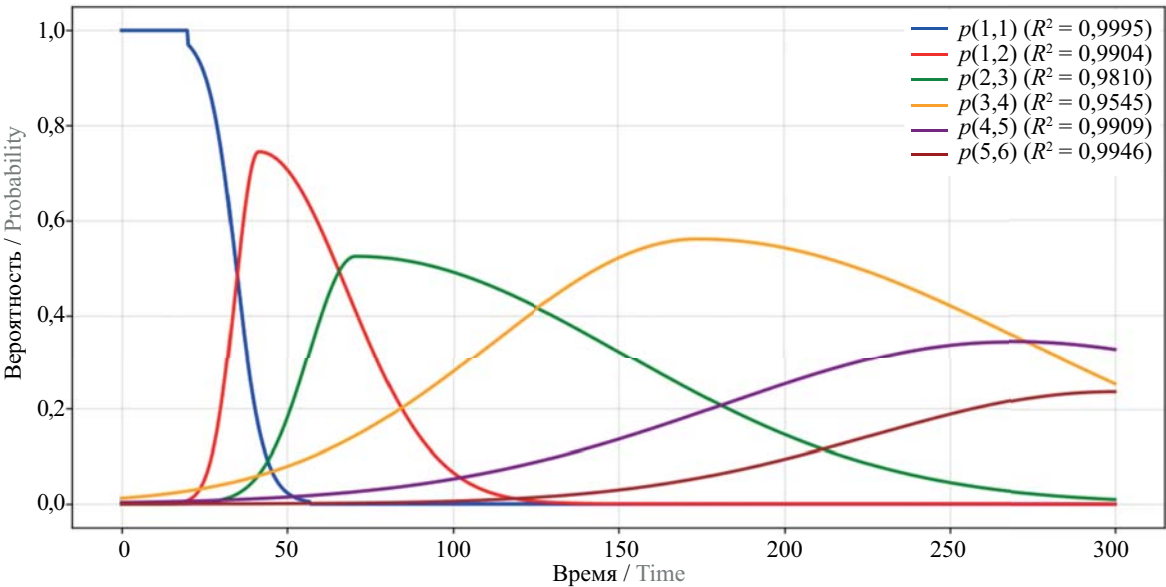
После верификации аппроксимирующих функций распределения выполнено построение интегрального вероятностно-временного графика, удовлетворяющего условию нормировки $\sum_{\forall \beta} p_{corr(\alpha,\beta)} = 1$, для любого момента времени $t \in [0, T]$, где T — расчетный период эксплуатации. Для статистического моделирования траекторий коррозионной деградации применен метод Монте-Карло, реализованный по следующей схеме:

1. В каждый дискретный момент времени t_i генерируется случайная величина $\xi \sim U(0, 1)$, распределение которой подобно распределению наиболее выраженному в данный момент времени t_i на временном пространстве.

2. Путем сравнения значения ξ с кумулятивными вероятностями состояний осуществляется отнесение элемента к одному из возможных коррозионных состояний S_i .

Таким образом осуществляется наработка данных на числе симуляций, равном 10 000.

С целью генерации случайных чисел использованы параметризованные распределения, наилучшим образом описывающие экспериментальные данные по начальным переходам. Указанный под-



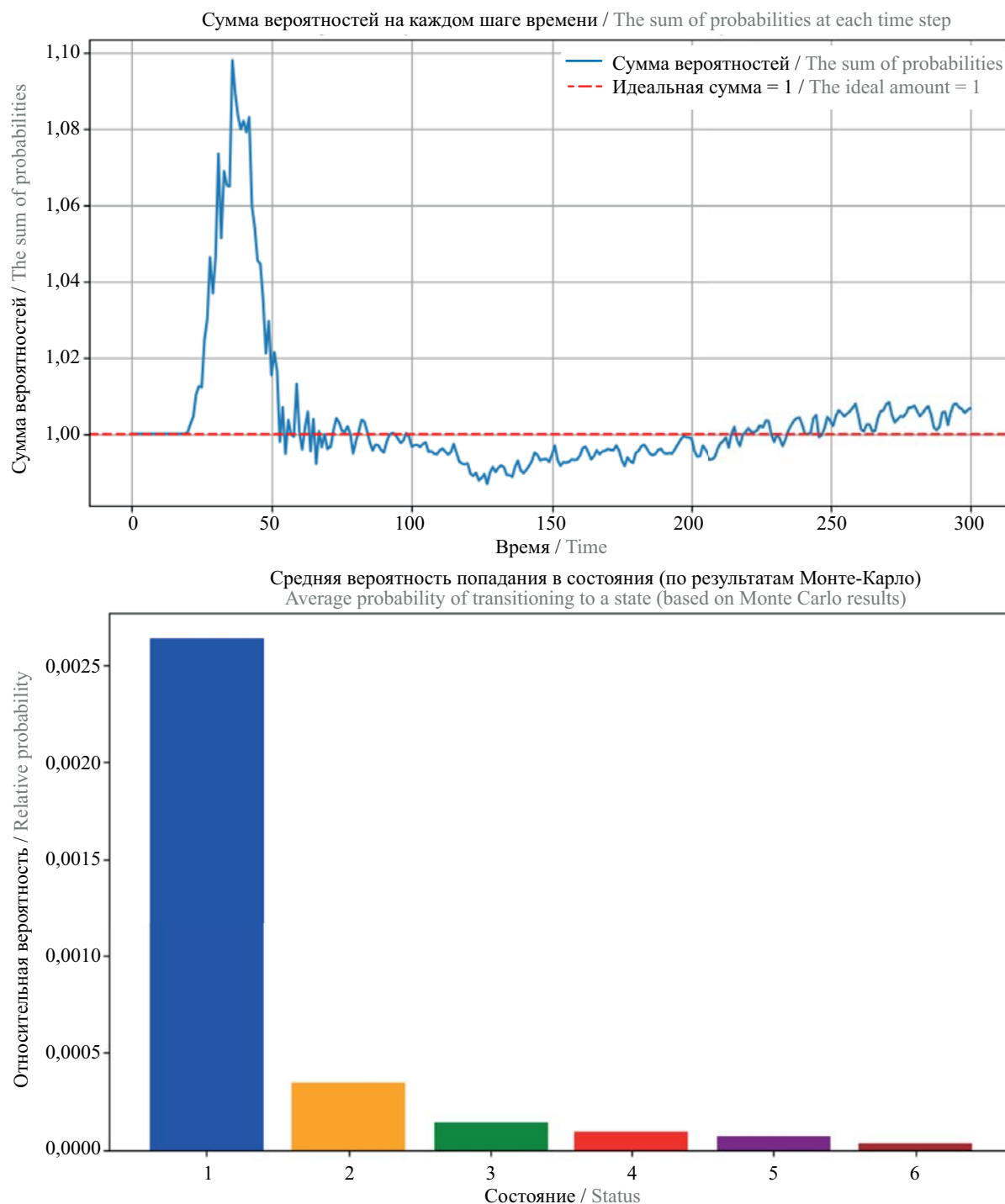


Рис. 5. Результаты реализации метода Монте-Карло для единичного элемента при 10^4 испытаний

Fig. 5. Monte Carlo simulation results for a single member with (10^4) trials

ход позволяет получить репрезентативную выборку реализаций случайного процесса коррозионной деградации и статистически оценить вероятности нахождения элемента в различных состояниях в произвольный момент времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе 10^4 независимых реализаций метода Монте-Карло получены временные ряды вероят-

ностей состояний и построены гистограммы времени достижения критических состояний (рис. 5). Установлено, что коэффициент вариации времен переходов между состояниями не превышает 15 %, что подтверждает адекватность предложенной вероятностной модели и позволяет перейти к анализу полной ферменной конструкции.

Реализация разработанной вероятностной модели коррозионной деградации выполнена посредством специализированного скрипта на языке Python,

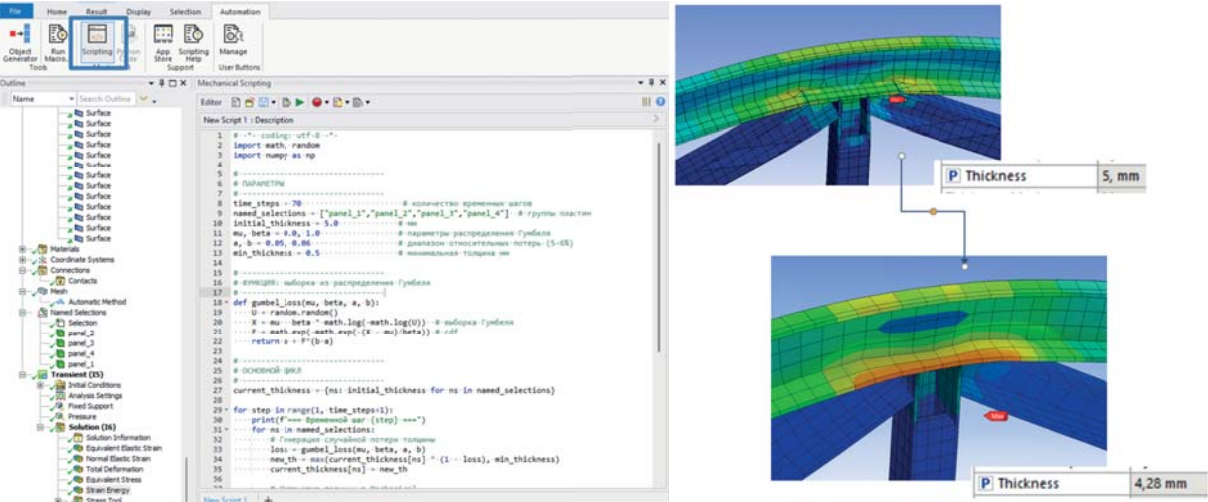


Рис. 6. Реализация вероятностной модели деградации металла ферменных элементов в ANSYS Mechanical
Fig. 6. Implementation of the probabilistic degradation model for truss members in ANSYS Mechanical

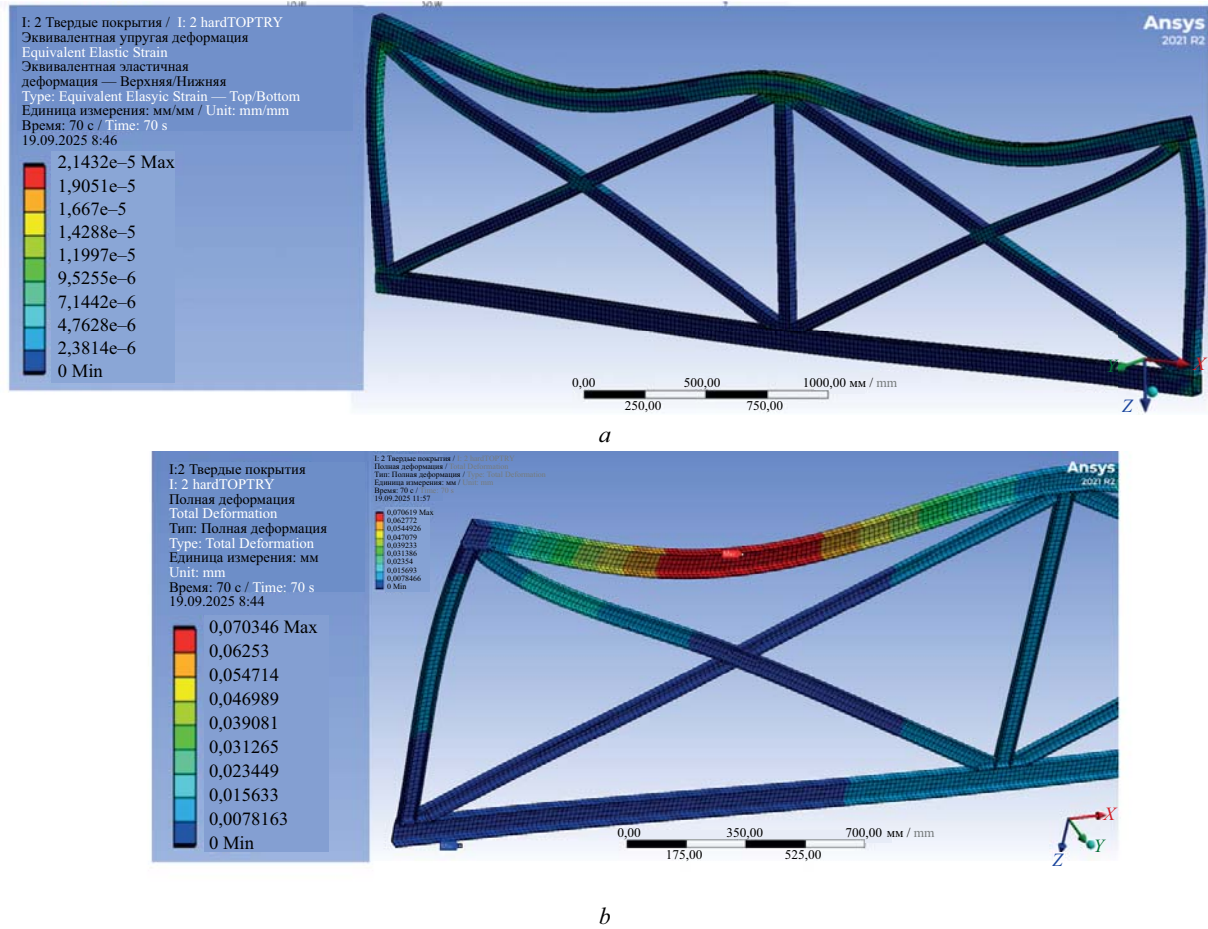


Рис. 7. Поля эквивалентных напряжений по Мизесу ($t = 70$ лет) (a); поле полных деформаций в ферменной конструкции ($t = 70$ лет) (b)
Fig. 7. Von Mises equivalent stress field ($t = 70$ years) (a); total strain field in the truss structure ($t = 70$ years) (b)

интегрированного с платформой ANSYS Mechanical (рис. 6). Алгоритм работы скрипта включает следующие операции:

- на каждом временном шаге t_i к толщине каждого сегмента стенки профиля применяется функ-

ция вероятностной деградации, основанная на графе переходных состояний;

- автоматическая регенерация сетки конечных элементов после изменения геометрических параметров.

Данная методика дает возможность воспроизвести пространственно неоднородный характер коррозионного износа на протяжении всего ЖЦ конструкции. Визуализация результатов расчета демонстрирует существенное изменение картины распределения эквивалентных напряжений по мере уменьшения толщины стенок профилей, что отражает перераспределение усилий в элементах ферменной системы.

В результате численного моделирования получены комплексные сведения о напряженно-деформированном состоянии ферменной конструкции. На рис. 7 представлены поля эквивалентных напряжений по Мизесу и деформаций, демонстрирующие пространственное распределение силовых факторов в элементах системы.

Для верификации предложенной методики выполнен анализ на временном срезе $t = 70$ лет, соответствующий периоду активного развития коррозионных повреждений. Полученная картина напряженного состояния демонстрирует корректность решения кра-

евой задачи с использованием разработанного алгоритма деградации металлических профилей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализована верификация модели в ПК ANSYS Mechanical с использованием метода Монте-Карло. Результаты анализа для временного горизонта 70 лет демонстрируют:

- запас прочности 2,8 при нормативном значении 1,5;
- вероятность отказа менее 10^{-4} при допустимом значении 10^{-3} ;
- остаточный ресурс более 25 лет.

Коэффициент вариации времен переходов между состояниями (5–15 %) свидетельствует о высокой предсказуемости коррозионного процесса в рамках предложенной модели. Разработанная методика позволяет перейти от консервативных детерминированных оценок к точным количественным прогнозам, что обеспечивает оптимизацию сроков и объемов ремонтных работ при гарантированном выполнении требований безопасности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Перельмутер А.В.* Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. М. : АСВ, 2007. 255 с. EDN QNMXBJ.
2. *Тамразян А.Г., Мацеевич Т.А., Савин С.Ю.* Оценка технического состояния несущих конструкций зданий на основе прогнозирования риска аварии // Строительство и реконструкция. 2024. № 6 (116). С. 82–91. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-116-6-82-91. EDN EQZYKS.
3. *Дормидонтова Т.В., Солкарян Н.Г.* Оптимизация надежности строительных конструкций // Пути улучшения качества автомобильных дорог : сборник статей. 2015. С. 87–92. EDN TWPPXZ.
4. *Меркулов С.И.* Развитие теории конструктивной безопасности объектов в условиях коррозионных воздействий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 3. С. 44–46. EDN SGFDVL.
5. *Морозов В.И., Анцыгин О.И., Савченко А.П.* Расчет и моделирование работы строительных конструкций с коррозионными повреждениями // Вестник гражданских инженеров. 2009. № 1 (18). С. 25–30. EDN JXOKEJ.
6. *Овчинников И.И., Овчинников И.Г.* Нелинейная механика конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами и физическими полями : монография. Уфа : Изд-во УГНТУ, 2024. 290 с.
7. *Stewart M.G., Al-Harthy A.* Pitting corrosion and structural reliability of corroding RC structures: Experimental data and probabilistic analysis // Reliability Engineering & System Safety. 2008. Vol. 93. Issue 3. Pp. 373–382. DOI: 10.1016/j.ress.2006.12.013
8. *Chernin L., Val D.V.* Prediction of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures // Construction and Building Materials. 2011. Vol. 25. Issue 4. Pp. 1854–1869. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.074
9. *Тамразян А.Г., Мацеевич Т.А.* Надежностная оптимизация конструкций с учетом неопределенностей при проектировании // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2022 : сб. докл. Третьей Национальной науч. конф. 2023. С. 50–54. EDN UPVVFT.
10. *Melchers R.E., Beck A.T.* Structural Reliability Analysis and Prediction. 3rd ed. Wiley, 2017. 472 p. DOI: 10.1002/9781119266105
11. *Val D.V., Chernin L., Stewart M.G.* Experimental and numerical investigation of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures // Journal of Structural Engineering. 2009. Vol. 135. Issue 4. Pp. 376–385. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2009)135:4(376)
12. *Biondini F., Vergani M.* Deteriorating beam finite element for nonlinear analysis of concrete structures under corrosion // Structure and Infrastructure Engineering. 2015. Vol. 11. Issue 4. Pp. 519–532. DOI: 10.1080/15732479.2014.951863
13. *Vu K.A.T., Stewart M.G.* Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models // Structural Safety. 2000.

Vol. 22. Issue 4. Pp. 313–333. DOI: 10.1016/s0167-4730(00)00018-7

14. Biondini F., Camnasio E., Palermo A. Life-time seismic performance of concrete bridges exposed to corrosion // *Structure and Infrastructure Engineering*. 2014. Vol. 10. Issue 7. Pp. 880–900. DOI: 10.1080/15732479.2012.761248

15. Соловьева А.А., Соловьев С.А. Исследования развития моделей случайных величин в расчетах надежности строительных конструкций при неполной статистической информации // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. №. 5. С. 587–607. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.587-607. EDN VJCFGH.

16. Kumar R., Gardoni P., Sanchez-Silva M. Effect of cumulative seismic damage and corrosion on the life-cycle cost of reinforced concrete bridges // *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2009. Vol. 38. Issue 7. Pp. 887–905. DOI: 10.1002/eqe.873

17. Frangopol D.M., Kim S. Service life, reliability and maintenance of civil structures // *Service Life Estimation and Extension of Civil Engineering Structures*. 2011. Pp. 145–178. DOI: 10.1533/97808-57090928.2.145

18. Kim S., Frangopol D.M. Inspection and monitoring planning for RC structures based on minimization of expected damage detection delay // *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2011. Vol. 26. Issue 2. Pp. 308–320. DOI: 10.1016/j.pro bengmech.2010.08.009. EDN OELPXH.

19. Darmawan M.S., Stewart M.G. Spatial time-dependent reliability analysis of corroding prestressed concrete bridge girders // *Structural Safety*. 2007. Vol. 29. Issue 1. Pp. 16–31. DOI: 10.1016/j.strusafe.2005.11.002

20. Mori Y., Ellingwood B.R. Reliability-based service-life assessment of aging concrete structures // *Journal of Structural Engineering*. 1993. Vol. 119. Issue 5. Pp. 1600–1621. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1993)119:5(1600)

21. Давыдов А.Н. Цепь Маркова как математическая модель строительной конструкции, работа-

ющей под нагрузкой // *Градостроительство и архитектура*. 2017. Т. 7. № 1 (26). С. 4–8. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.01.1. EDN YRDUAZ.

22. Rodriguez J., Ortega L.M., Casal J. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement // *Construction and Building Materials*. 1997. Vol. 11. Issue 4. Pp. 239–248. DOI: 10.1016/s0950-0618(97)00043-3

23. Tuutti K. Corrosion of Steel in Concrete. Stockholm : Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. 469 p.

24. Val D.V., Stewart M.G. Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments // *Structural Safety*. 2003. Vol. 25. Issue 4. Pp. 343–362. DOI: 10.1016/s0167-4730(03)00014-6

25. O'Connor A.J., Kenshel O. Experimental evaluation of the scale of fluctuation for spatial variability modeling of chloride-induced reinforced concrete corrosion // *Journal of Bridge Engineering*. 2013. Vol. 18. Issue 1. Pp. 3–14. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000370

26. Straub D. Stochastic modeling of deterioration processes through dynamic Bayesian networks // *Journal of Engineering Mechanics*. 2009. Vol. 135. Issue 10. Pp. 1089–1099. DOI: 10.1061/(asce)em.1943-7889.0000024

27. Kwon K., Frangopol D.M. Bridge fatigue reliability assessment using probability density functions of equivalent stress range based on field monitoring data // *International Journal of Fatigue*. 2010. Vol. 32. Issue 8. Pp. 1221–1232. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2010.01.002

28. Matseevich T.A., Dankov S.A. Probabilistic Approach of State Transition Elements of Truss Structures at Corrosion // *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 535. P. 01003. DOI: 10.1051/e3sconf/202453501003

29. Мацевич Т.А., Андреев И.Ф. Конечно-элементная модель диффузии хлорида в предварительно напряженной корродированной арматуре железобетонных конструкций // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. № 11. С. 1462–1470. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1462-1470. EDN VXJBVQ.

Поступила в редакцию 19 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 31 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 31 марта 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Татьяна Анатольевна Мацевич — доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры высшей математики; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 1299-6980, Scopus: 51461741900, ORCID: 0000-0001-6292-0759; MatseevichTA@mgsu.ru;

Савелий Андреевич Данков — аспирант кафедры высшей математики; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7754-0683; olimp.botek@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Perel'muter A.V. *Selected problems of reliability and safety of building structures*. Moscow, ASV, 2007; 255. EDN QNMXBJ. (rus.).
2. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A., Savin S.Yu. Assessment of the technical condition of load-bearing structures of buildings based on accident risk forecasting. *Building and Reconstruction*. 2024; 6(116):82-91. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-116-6-82-91. EDN EQZYKS. (rus.).
3. Dormidontova T.V., Solkaryan N.G. Optimization of structural reliability. *Ways to Improve Road Quality*. 2015; 87-92. EDN TWPPXZ. (rus.).
4. Merkulov S.I. Development of the theory of structural safety of facilities under corrosion impacts. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2014; 3:44-46. EDN SGFDVL. (rus.).
5. Morozov V.I., Antsygin O.I., Savchenko A.P. Calculating and modeling the operation of structures with corrosion damages. *Bulletin of Civil Engineers*. 2009; 1(18):25-30. EDN JXOKEJ. (rus.).
6. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G. *Nonlinear mechanics of structures interacting with aggressive environments and physical fields : monograph*. Ufa, Izd-vo UGNTU, 2024; 290. (rus.).
7. Stewart M.G., Al-Harthy A. Pitting corrosion and structural reliability of corroding RC structures: Experimental data and probabilistic analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. 2008; 93(3):373-382. DOI: 10.1016/j.ress.2006.12.013
8. Chernin L., Val D.V. Prediction of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*. 2011; 25(4): 1854-1869. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.074
9. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A. Reliability optimization of structures taking into account uncertainties in design. *Actual problems of the construction industry and education – 2022 : collection of reports of the Third National Scientific Conference*. 2023; 50-54. EDN UPVVFT. (rus.).
10. Melchers R.E., Beck A.T. *Structural Reliability Analysis and Prediction*. 3rd ed. Wiley, 2017; 472. DOI: 10.1002/9781119266105
11. Val D.V., Chernin L., Stewart M.G. Experimental and numerical investigation of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures. *Journal of Structural Engineering*. 2009; 135(4):376-385. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2009)135:4(376)
12. Biondini F., Vergani M. Deteriorating beam finite element for nonlinear analysis of concrete structures under corrosion. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2015; 11(4):519-532. DOI: 10.1080/15732479.2014.951863
13. Vu K.A.T., Stewart M.G. Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models. *Structural Safety*. 2000; 22(4):313-333. DOI: 10.1016/s0167-4730(00)00018-7
14. Biondini F., Camnasio E., Palermo A. Lifetime seismic performance of concrete bridges exposed to corrosion. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2014; 10(7):880-900. DOI: 10.1080/15732479.2012.761248
15. Soloveva A.A., Solovev S.A. A research into the development of models of random variables as part of the structural reliability analysis performed in the absence of some statistical information. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(5):587-607. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.587-607. EDN VJCFGH. (rus.).
16. Kumar R., Gardoni P., Sanchez-Silva M. Effect of cumulative seismic damage and corrosion on the life-cycle cost of reinforced concrete bridges. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2009; 38(7):887-905. DOI: 10.1002/eqe.873
17. Frangopol D.M., Kim S. Service life, reliability and maintenance of civil structures. *Service Life Estimation and Extension of Civil Engineering Structures*. 2011; 145-178. DOI: 10.1533/9780857090928.2.145
18. Kim S., Frangopol D.M. Inspection and monitoring planning for RC structures based on minimization of expected damage detection delay. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2011; 26(2):308-320. DOI: 10.1016/j.probengmech.2010.08.009. EDN OELPXH.
19. Darmawan M.S., Stewart M.G. Spatial time-dependent reliability analysis of corroding pretensioned prestressed concrete bridge girders. *Structural Safety*. 2007; 29(1):16-31. DOI: 10.1016/j.strusafe.2005.11.002
20. Mori Y., Ellingwood B.R. Reliability-based service-life assessment of aging concrete structures. *Journal of Structural Engineering*. 1993; 119(5):1600-1621. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1993)119:5(1600)
21. Davydov A.N. Markov chain as a mathematical model of building structure working under load. *Urban Construction and Architecture*. 2017; 7(1): (26):4-8. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.01.1. EDN YRDUAZ. (rus.).
22. Rodriguez J., Ortega L.M., Casal J. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement. *Construction and Building Materials*. 1997; 11(4):239-248. DOI: 10.1016/s0950-0618(97)00043-3
23. Tuutti K. *Corrosion of Steel in Concrete*. Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982; 469.
24. Val D.V., Stewart M.G. Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments. *Structural Safety*. 2003; 25(4):343-362. DOI: 10.1016/s0167-4730(03)00014-6
25. O'Connor A.J., Kenshel O. Experimental evaluation of the scale of fluctuation for spatial variability modeling of chloride-induced reinforced concrete corro-

sion. *Journal of Bridge Engineering*. 2013; 18(1):3-14. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000370

26. Straub D. Stochastic modeling of deterioration processes through dynamic Bayesian networks. *Journal of Engineering Mechanics*. 2009; 135(10):1089-1099. DOI: 10.1061/(asce)em.1943-7889.0000024

27. Kwon K., Frangopol D.M. Bridge fatigue reliability assessment using probability density functions of equivalent stress range based on field monitoring data. *International Journal of Fatigue*. 2010; 32(8):1221-1232. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2010.01.002

28. Matseevich T.A., Dankov S.A. Probabilistic Approach of State Transition Elements of Truss Structures at Corrosion. *E3S Web of Conferences*. 2024; 535:01003. DOI: 10.1051/e3sconf/202453501003

29. Matseevich T.A., Andreev I. F The finite element model of chloride diffusion in pre-stressed corroded reinforcement bars of reinforced concrete structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1462-1470. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1462-1470. EDN VXJBVQ. (rus.).

Received December 19, 2025.

Adopted in revised form on March 31, 2026.

Approved for publication on March 31, 2026.

B I O N O T E S : **Tatyana A. Matseevich** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Higher Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 1299-6980, Scopus: 51461741900, ORCID: 0000-0001-6292-0759; MatseevichTA@mgsu.ru;

Saveliy A. Dankov — postgraduate student of the Department of Higher Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 7754-0683; olimp.botek@mail.ru.

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

The authors declare no conflicts of interest.

Развитие методологии исследований, направленной на управление структурообразованием цементных композитов

Андрей Александрович Леденев¹, Виктор Тихонович Перцев²

¹ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) (ВУНЦ ВВС «ВВА»); г. Воронеж, Россия;

² Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); г. Воронеж, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие методологии исследований, направленной на управление структурообразованием цементных композитов, является актуальной задачей современной технологии бетонов, включающих многокомпонентные смеси и добавки. Решение данной задачи предусматривает применение методов количественной оценки структуры и свойств на различных масштабных уровнях и этапах структурообразования. Цель работы — развитие методологии исследований на основе анализа и установления закономерностей формирования структуры и свойств на различных масштабных уровнях и этапах структурообразования, направленной на повышение эффективности технологии цементных композитов и бетонов.

Материалы и методы. Анализ структурообразования дисперсных систем и цементных композитов проводили на основе модели фрактальных кластеров и теории протекания (перколяции). Применяли физико-химические методы — оптическую и электронную микроскопию, вискозиметрию, определение активности; компьютерное и математическое моделирование; физико-механические испытания.

Результаты. Обоснованы направления развития методологии исследований на основе системного подхода, отличающегося применением модели фрактальных кластеров, для установления количественных показателей на различных масштабных уровнях и этапах структурообразования. Структурно-феноменологический анализ дисперсных систем и композитов позволил уточнить и дополнить представления о механизме их структурообразования. Установлены количественные зависимости между фрактально-кластерными процессами на микроуровне и свойствами с учетом дисперсности, природы и характеристик поверхности минеральных компонентов в составе цементных композитов. На базе метода исследования структурообразования на мезо- и макроуровнях, базирующегося на геометрическом моделировании плотных упаковок, скорректирован гранулометрический состав заполнителей для получения более плотной структуры бетона.

Выводы. Методология исследований расширяет возможности управления структурообразованием и прогнозирования формирующихся структур цементных композитов. На основе системных исследований от микро- до макроуровня с оценкой эффективности минеральных компонентов в составе органоминеральных добавок, а также оптимизации гранулометрического состава заполнителей получены цементные бетоны с улучшенными физико-механическими свойствами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цементные композиты, дисперсные системы, методология исследований, структурообразование, фрактально-кластерные структуры, масштабные уровни структуры, цементные бетоны

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Леденев А.А., Перцев В.Т. Развитие методологии исследований, направленной на управление структурообразованием цементных композитов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 4. С. 541–559. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.541-559

Автор, ответственный за переписку: Андрей Александрович Леденев, ledenoff@mail.ru.

Development of a research methodology aimed at controlling the formation of the microstructure of cement composites

Andrey A. Ledenev¹, Victor T. Pertsev²

¹ Military Educational and Scientific Centre of the Air Force “N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy” (Voronezh); Voronezh, Russian Federation;

² Voronezh State Technical University (VSTU); Voronezh, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The development of a research methodology aimed at controlling the structural formation of cementitious composites is a pressing challenge in modern concrete technology, which involves multi-component mixtures and addi-

tives. Addressing this challenge requires the application of methods for the quantitative assessment of structure and properties at various scales and stages of structural formation. The aim of this work is to develop a research methodology based on the analysis and identification of patterns in the formation of structure and properties at various scales and stages of structure formation, aimed at improving the efficiency of cement composite and concrete technology.

Materials and methods. The analysis of the structural formation of dispersed systems and cement composites was carried out using a fractal cluster model and percolation theory. The following physicochemical methods were employed: optical and electron microscopy, viscometry, and activity determination; as well as computer and mathematical modelling; and physical and mechanical testing.

Results. The paper outlines directions for the development of research methodology based on a systems approach, characterized by the application of a fractal cluster model, to establish quantitative indicators at various scales and stages of structure formation. A structural-phenomenological analysis of dispersed systems and composites has made it possible to refine and supplement our understanding of the mechanism of their structure formation. Quantitative relationships have been established between fractal-cluster processes at the micro-level and properties, taking into account the dispersion, nature and surface characteristics of the mineral components in cement composites. Based on a method for investigating structure formation at the meso- and macro-levels, which relies on geometric modelling of close-packed structures, the particle size distribution of aggregates has been adjusted to achieve a denser concrete structure.

Conclusions. This research methodology expands the scope for controlling the formation of structures and predicting the resulting structures of cement composites. Based on systematic studies ranging from the micro- to the macro-level, involving an assessment of the effectiveness of mineral components in organo-mineral additives, as well as the optimization of the particle size distribution of fillers, cement concretes with improved physical and mechanical properties have been produced.

KEYWORDS: cement composites, dispersed systems, research methodology, structure formation, fractal cluster structures, structural scales, cement-based concretes

FOR CITATION: Ledenev A.A., Pertsev V.T. Development of a research methodology aimed at controlling the formation of the microstructure of cement composites. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(4):541-559. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.541-559 (rus.).

Corresponding author: Andrey A. Ledenev, ledenoff@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Управление структурообразованием цементных композитов относится к числу актуальных направлений повышения эффективности технологии бетона. Феноменологические подходы, основанные на регулировании рецептурно-технологических факторов с оценкой показателей структуры и свойств, дают возможность решить широкий круг технологических задач. Однако зачастую результаты исследований на отдельных масштабных уровнях, например на нано- или микроуровнях, сразу переносятся на уровень готового изделия без совместного рассмотрения и учета характерных процессов, протекающих на более крупных мезо- и макроуровнях. Это не позволяет системно оценить взаимосвязь процессов структурообразования и свойств. Развитие методологии исследований может быть реализовано на основе системного структурно-феноменологического анализа процессов, протекающих на всех этапах структурообразования и различных масштабных уровнях.

В системе цементных композитов от микроуровня (10^{-7} – 10^{-5} м; 0,1–10 мкм) до мезоуровня (10^{-5} – 10^{-3} м; 10–1000 мкм) характерны процессы самоорганизации при взаимодействии частиц компонентов с дисперсионной средой за счет влияния поверхностных сил физико-химической природы. Структурообразование существенно отличается от классических представлений механики грубо-дисперсных систем с образованием не отдельных элементов, а неоднородных фрактально-кластерных систем, отличающихся наличием агрегатов частиц твердой фазы (рис. 1) [1]. При этом сформирован-

ные связнодисперсные (сухие) системы (рис. 1, а), а также коагуляционные (обводненные) системы (рис. 1, б) сохраняются в кристаллизационных (затвердевших) системах (рис. 1, в), что сказывается на проявлении свойств цементного композита.

С практической точки зрения важность развития методов проектирования состава и подбора компонентов, обеспечивающих формирование эффективных структур, проявляется в современной технологии цементных бетонов. Согласно положениям фундаментальных и прикладных наук, дальнейшее развитие технологии невозможно без применения многокомпонентных смесей, включающих комплекс химических добавок, минеральных компонентов, органоминеральных добавок, микро- и наноструктурирующих материалов [2–8].

Значимая роль в управлении структурообразованием цементных композитов отводится минеральным компонентам. При их применении существенно изменяется структурная топология — системообразующим элементом является цементно-минеральная система, включающая высокодисперсные частицы [2, 3, 8–11]. Имеющаяся база научно-практических данных по использованию минеральных компонентов для получения органоминеральных добавок активно развивается, несмотря на большое количество исследовательских работ в этом направлении. Основные компоненты в производстве органоминеральных добавок — микрокремнезем и его разновидности [2]. Получены сведения по применению комплексных добавок на основе материалов природного и техногенного происхождения, таких как вулканогенно-осадочные породы, диатомит, известняк,

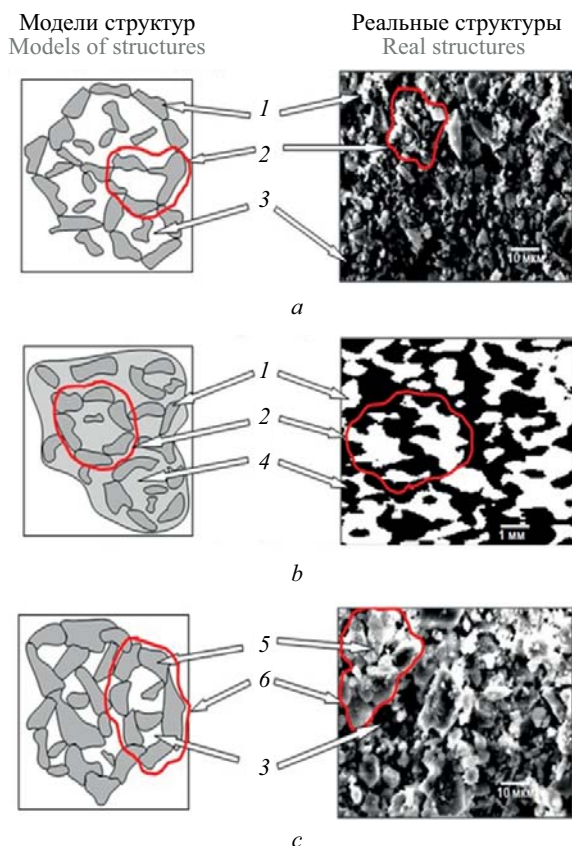


Рис. 1. Модельные и реальные структуры дисперсных систем: *a* — связнодисперсные (сухие) системы; *b* — коагуляционные (обводненные) системы; *c* — кристаллизационные (затвердевшие) системы; 1 — частица твердой фазы; 2 — агрегат частиц; 3 — поры; 4 — дисперсионная среда; 5 — дисперсная фаза; 6 — агрегат твердой фазы

Fig. 1. Model and real structures of dispersed systems: *a* — cohesive-dispersed (dry) systems; *b* — coagulation (hydrated) systems; *c* — crystallization (solidified) systems; 1 — solid-phase particle; 2 — aggregate of particles; 3 — pores; 4 — dispersion medium; 5 — dispersed phase; 6 — solid-phase aggregate

зола-унос, метакраин и др. [12–16]. Проведены исследования по влиянию глинистых и карбонатных пород в составе минеральных добавок (МД) на процессы гидратационного структурообразования и свойства цементных систем [17].

Проведенный анализ показал, что, как правило, при изучении процессов формирования структуры выделяется роль «химического» фактора взаимодействия активных минеральных добавок с продуктами гидратации, а также «физического» фактора уплотнения микроstructures цементного композита тонкодисперсными компонентами. Однако механизм структурообразования гетерогенной цементной системы, включающей минеральные компоненты, отличается многофункциональностью и разнонаправленностью, что сказывается на физико-химической активности и эффективности применения. Как было отмечено, вследствие высокой поверхностной активности

реализуются межчастичные и межфазные взаимодействия, способствующие формированию агрегированных фрактальных кластеров, которые рассматриваются как структурные элементы новой фазы, определяющие свойства всей системы (см. рис. 1). При этом существующие подходы к оценке микроstructures, основанные на анализе формирования элементов относительно правильной геометрической формы в уже сформированной системе, не в полной мере соответствуют реальным композитам.

Развитие методологии исследования цементных композитов как дисперсно-неупорядоченных систем может быть реализовано на базе концепции фрактально-кластерной геометрии, теории протекания, которые ранее использовались для строительных композитов различного назначения, а также обводненных дисперсных систем [1, 18, 19]. Однако применительно к цементным композитам существует ряд проблемных вопросов: фрактальность рассматриваемых объектов оценивается различными методами в зависимости от иерархического уровня структуры, что требует единого методического подхода; необходимо количественное описание условий и механизмов формирования фрактальных кластеров от ранней стадии структурообразования к готовой структуре.

Решение данных вопросов позволит расширить имеющиеся возможности научно-обоснованного управления и прогнозирования формирующихся структур на микроуровне с учетом влияния дисперсности, природы, свойств поверхности частиц твердой фазы минеральных компонентов, в том числе с применением эффективных материалов на основе местной, доступной сырьевой базы различных регионов.

При структурообразовании цементных композитов и бетонов в масштабе от мезо- до макроуровня (10^{-3} м; более 1000 мкм) определяющими становятся процессы, характерные для грубодисперсных зернистых систем — межчастичные и межагрегатные взаимодействия, относительное движение частиц, формирование плотных упаковок. В таких системах роль поверхностных сил и взаимодействий снижается, механизмы формирования структуры обусловлены инерционными (массогабаритными) характеристиками — формой, размерами, гранулометрическим составом частиц мелкого и крупного заполнителей. Зачастую для природных заполнителей свойственно избыточное содержание мелкой фракции, что приводит к разуплотнению системы, или ее недостаточное количество для заполнения межзерновых пустот. В этом случае задача управления структурообразованием в части получения эффективной (более плотной) структуры может быть решена за счет применения методов анализа структуры, основанных на геометрическом моделировании («конструировании») плотных упаковок. Увеличение плотности при снижении пустотности

упаковки заполнителей оптимизированного состава на этапе раннего структурообразования обеспечит улучшение физико-технических свойств бетонных смесей и бетонов.

Таким образом, системный анализ на различных масштабных уровнях — от микро- до макроуровня, а также этапах — от раннего структурообразования до затвердевшей системы является одним из аспектов развития методологии исследований. Получение новых количественных данных, объединяющих вид структуры, геометрическое построение, структурные показатели и свойства, даст возможность расширить представления о механизме взаимодействия компонентов, что станет научно-практическим заданием дальнейшего совершенствования составов и технологий цементных композитов и бетонов.

Цель работы — развитие методологии исследований на основе анализа и установления закономерностей формирования структуры и свойств на различных масштабных уровнях и этапах структурообразования, направленной на повышение эффективности технологий цементных композитов и бетонов.

Задачи:

1) обоснование направлений развития методологии и методов исследований на основе применения модели фрактальных кластеров для анализа и установления закономерностей формирования структуры и свойств дисперсных систем и цементных композитов на различных масштабных уровнях и этапах структурообразования;

2) структурно-феноменологический анализ взаимосвязи структурообразования и свойств дисперсных систем и цементных композитов с использованием комплекса физико-химических методов исследований и моделирования;

3) анализ и установление количественных взаимосвязей между показателями структуры и свойствами, позволяющих расширить представления о механизме структурообразования и прогнозировать вид формирующихся структур с учетом характеристик компонентов цементных композитов и бетонов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках развития методологии исследований решение задач управления структурообразованием цементных композитов во многом связано с применением методов количественной оценки структуры дисперсных систем, характеризующихся наличием частиц и агрегатов с неоднородной поверхностью в виде микродефектов, конденсированных сред и межфазных границ (рис. 2) [1, 18, 19].

В работе исследуемые структуры рассмотрены в рамках модели фрактальных кластеров, обладающих свойством масштабной инвариантности, физический смысл которых описывается скейлинговой зависимостью [1]:

$$N \sim R^D, \quad (1)$$

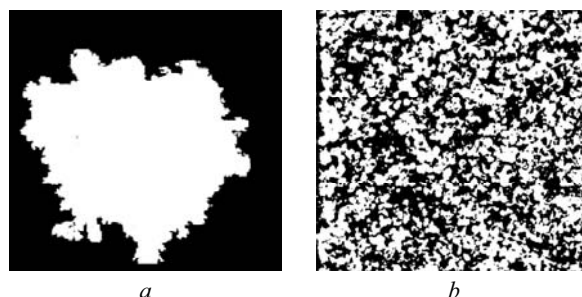


Рис. 2. Фрактальные структуры песка: *a* — отдельная частица ($\times 1250$); *b* — агрегированные частицы при $120 \text{ м}^2/\text{кг}$ ($\times 4$) [19]

Fig. 2. Fractal structures of sand: *a* — a single particle ($\times 1,250$); *b* — aggregated particles at $120 \text{ м}^2/\text{кг}$ ($\times 4$) [19]

где N — число частиц, образующих фрактальный кластер; R — размер фрактального кластера (величина масштаба); D — фрактальная размерность структуры (показатель фрактальности).

В отличие от топологического показателя «абсолютно плотного» (компактного) пространства d — «евклидовой» размерности, показатель фрактальности D имеет дробную размерность (рис. 3). Если количество частиц N в окружности радиуса R формирует компактную структуру с размерностью $d = 2$, тогда $N \sim R^d$ (рис. 3, *a*). Для фрактальной структуры — $N \sim R^D$ (рис. 3, *b*), при этом показатель фрактальности изменяется в диапазоне $D = 1-2$. Неоднородный характер фрактальной структуры проявляется в изменении свойств исследуемых систем и композитов, таких как плотность, прочность и др. [1, 19].

Технически показатель фрактальности может быть определен различными методами, сущность которых состоит в разбиении области, соответствующей R , на отдельные элементы изображения (квадраты или клетки), и рассчитывается число элементов N , связанных с фракталом [1]. После чего строится прямая $N(R)$ в двойных логарифмических координатах,

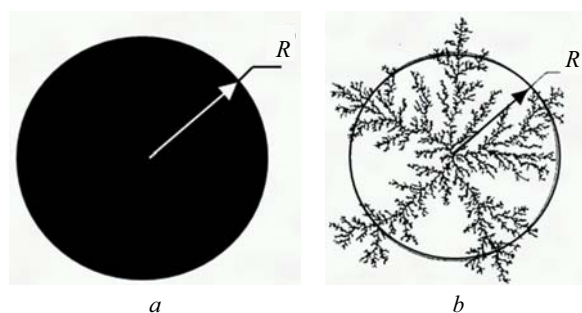


Рис. 3. Компактная структура с размерностью пространства $d = 2$ (*a*) и фрактально-кластерная структура с показателем фрактальности $D = 1,71$ (*b*) [19]

Fig. 3. Compact structure with dimensions of a quantity of space $d = 2$ (*a*) and fractal-cluster structure with an index fractal $D = 1.71$ (*b*) [19]

тангенс угла наклона которой будет соответствовать фрактальности D согласно зависимости:

$$D = \frac{\Delta \ln N}{\Delta \ln R}. \quad (2)$$

В дисперсных системах и композитах фрактальные объекты формируются как в виде отдельных кластеров, так и в виде перколяционного («бесконечного») кластера, определяющего свойства всей системы. Опираясь на существующие положения фрактальной геометрии, статистической физики, теории протекания, в качестве показателей структуры применяли [1]:

- показатель фрактальности ($D = 1-2$ для двумерных и $D = 2-3$ трехмерных объектов) — основная количественная характеристика, показывающая степень заполнения пространства неоднородных систем, обладающих самоподобием (инвариантностью) на различных масштабных уровнях;
- концентрация кластеров (φ, φ^*) — соответствует условиям формирования сети фрактальных кластеров в дисперсной системе;
- межкластерная пустотность P_c — характеризует степень пустотности фрактального кластера;
- порог протекания v_c — критическая доля сфер (частиц) от общего объема фрактальной системы, соответствующая переходу от конечных кластеров к «бесконечному»;
- координационное число z — соответствует числу контактов элемента структуры в системе;
- плотность упаковки частиц μ — характеризует размещение элементов в системе;
- тип пространственной решетки кластера или топология — характеризует геометрическую структуру кластера, решетчатую упаковку.

Исследования проводили с применением современных физико-химических методов и моделирования, что позволило системно рассмотреть взаимосвязь качественных и количественных характеристик структуры на различных масштабных уровнях (от микро- до макроуровня) и этапах структурообразования.

В работе применяли портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Н производства ЗАО «Осколцемент» (ГОСТ 31108–2020); дисперсность $S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$; минералогический состав (масс. %) $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ — 68,98; $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ — 10,87; $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ — 8,77; $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ — 11,38.

Исследуемыми материалами, модифицирующими микроструктуру цементных композитов, являлся комплекс минеральных компонентов:

- песок кварцевый молотый (песок) месторождения Воронежской области, дисперсностью $S_{уд} = 50-700 \text{ м}^2/\text{кг}$ с содержанием $\text{SiO}_2 = 98 \%$;
- зола-унос ТЭЦ (зола), г. Воронеж, $S_{уд} = 50-700 \text{ м}^2/\text{кг}$, химический состав представлен $\text{SiO}_2 = 63 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 18 \%$, $\text{CaO} = 10 \%$, прочее 9% ;

- активированный диатомит (биокремнезем) производства ООО «Торговый Дом “ВЕФТ”», г. Королев, $S_{уд} = 2000 \text{ м}^2/\text{кг}$; содержание $\text{SiO}_2 = 88 \%$.

Минеральные компоненты применяли как отдельно, так и комплексно в составе органоминеральных добавок совместно с добавками поверхностно-активных веществ (ПАВ) пластифицирующего действия на основе поликарбоксилатов — Melflux 2651F и SikaViscoCrete-240 HE Plus. Дозировка минеральных компонентов составляла 5–20 %, добавок ПАВ 0,6–0,8 % от массы цемента.

При исследовании сухих дисперсных систем — минеральных компонентов композита в качестве структурных характеристик определяли показатели межкластерной пустотности P_c , плотности упаковки μ . Также устанавливали координационное число пространственной решетки сформированной системы z , связанное с пористостью и плотностью, на основе зависимости [1]:

$$z = \frac{\mu}{0,085}, \quad (3)$$

где μ — плотность упаковки сформированной дисперсной системы (определяли по отношению насыпной плотности ρ_n к плотности частиц твердой фазы ρ).

Исследование физико-химической активности минеральных компонентов выполняли по методике поглощения извести, аналогичной ранее действующему ГОСТ 6269. В ходе испытаний готовили серию титровальных растворов извести и соляной кислоты. Используя кислотно-щелочной индикатор, оценивали физико-химическую активность компонентов при различной степени дисперсности. Активность устанавливали в расчете на единицу массы частиц — г/кг, также рассчитывали удельную активность единицы площади поверхности — г/м². По полученным результатам строили графические зависимости активности (по поглощению извести) от дисперсности.

Моделирование динамики структурообразования обводненных дисперсий проводили с применением компьютерной программы Maple. В ходе моделирования определяли количественные характеристики микроструктуры, такие как показатель фрактальности D и концентрация кластеров φ^* на основе решения следующей системы уравнений [1]:

$$\frac{\eta_{эфф}(\varphi, \tau)}{\eta_0} = \frac{1 - \varphi_A}{(1 - \varphi_A/\varphi^*)}; \quad (4)$$

$$\varphi_A \approx \varphi \left[1 + \left(\frac{\tau_0}{\tau} \right)^{1/2} \right]^{3-D},$$

где $\eta_{эфф}(\varphi, \tau)$ — «эффективная» вязкость кластерной суспензии; η_0 — вязкость жидкой фазы; φ — концентрация твердой фазы; φ_A — «эффективная» концентрация кластеров; φ^* — критическая концентрация кластеров; τ_0 — предельное напряжение сдвига; τ — напря-

жение сдвига; D — показатель фрактальности системы.

Структурные показатели D и ϕ^* находили обратным пересчетом, используя уравнения (4) и экспериментальную зависимость, полученную методом ротационной вискозиметрии (на приборах РВ-4 и VB-2000):

$$\eta_{эфф} = f(\tau). \quad (5)$$

Исследование структуры поверхности сухих частиц и обводненных дисперсных систем на основе минеральных компонентов осуществили оптическим методом на установке, состоящей из микроскопа Biolam D-12 и цифрового фотоаппарата Olympus SP-500 UZ. Установка позволяла получить изображения структуры при увеличении до 500 раз с разрешением до 300 пикс/дюйм.

Оценивали взаимосвязи структурно-топологических и прочностных показателей цементных композитов с помощью методов и моделей теории протекания [1]. При моделировании выявляли условия, обеспечивающие усиливающий эффект повышения прочности за счет создания в структуре композита перколяционного кластера — каркаса, определяющего его свойства. Количественным показателем, характеризующим критическую долю (объемное содержание) минерального компонента в структуре композита, соответствующую переходу от конечных кластеров к бесконечному, служил порог протекания v_c в соответствии с зависимостью [1]:

$$v_c = \frac{N\pi d^3}{6}, \quad (6)$$

где N — число сфер (моделей) частиц твердой фазы минерального компонента; d — эквивалентный диаметр частиц минерального компонента.

Визуализацию и определение показателей структуры цементного композита, наполненного минеральными компонентами, проводили путем компьютерного моделирования в программе Unity3d. Создавались модели частиц твердой фазы, вводились расчетные значения характеристик компонентов — плотность; диаметр; объемное и массовое содержание и др. На основании этих данных рассчитывали соотношение частиц цемента и минерального компонента c , близкое к значению порога протекания v_c , соответствующего наибольшей прочности цементного композита. Значение показателя c при различном соотношении компонентов устанавливали в соответствии с зависимостью:

$$c = n_{mk}/n_c, \quad (7)$$

где n_{mk} , n_c — концентрации (счетные) частиц минерального компонента и цемента определяли согласными зависимостям:

$$n_{mk} = \frac{6m_{mk}}{\pi d_{mk}^3 \rho_{mk}}; \quad (8)$$

$$n_c = \frac{6m_c}{\pi d_c^3 \rho_c}, \quad (9)$$

где m_{mk} , m_c — доля частиц минерального компонента и цемента; d_{mk} , d_c — эквивалентный диаметр частиц минерального компонента и цемента; ρ_{mk} , ρ_c — плотность частиц минерального компонента и цемента.

Прочность цементного композита (цементного камня) на сжатие $R_{сж}$ оценивали на образцах $2 \times 2 \times 2$ см. Для композита, включающего только минеральные компоненты, испытания проводили при постоянном В/Ц = 0,36. При использовании органо-минеральных добавок — при постоянной реологической характеристике, равной 13–14 см по Суттарду.

После испытаний на прочность путем шлифования разрушенных образцов готовили пробы размером $0,5 \times 0,5 \times 0,2$ см для анализа микроструктуры композита с применением сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии. Методом сканирующей микроскопии на установке Jeol jsm-6380LV получали микрофотографии структуры при увеличении в 2000 раз. Электронные изображения использовали для фрактального анализа микроструктуры. Количественное определение показателя фрактальности D осуществляли методом «островов среза» («периметр — площадь») в программе Fractall.Stat 3.1 [20]. Для реализации данного метода электронное изображение микроструктуры преобразовывали в черно-белое, затем последовательно разбивали на фрагменты (островки или клетки) и рассчитывали площадь плотных зон и периметр для каждого выделенного фрагмента. Показатель D рассчитывали как тангенс угла наклона зависимости периметра плотных зон от их площади, построенной в двойных логарифмических координатах, в соответствии с выражением (2). Методом атомно-силовой микроскопии на установке NanoEducator получали трехмерные изображения поверхности структуры цементного композита, по которым количественно оценивали показатель микрошероховатости (s , мкм), косвенно связанный с фрактальностью. Площадь участка сканирования структуры поверхности составляла 80 мкм^2 .

Анализ структурообразования грубодисперсных систем при переходе от мезо- к макроуровню осуществляли методом «Вороного — Делоне» (Voronoi — Delaunay) для получения эффективной (более плотной) структуры дисперсно-зернистой системы [19]. Метод основан на геометрическом моделировании («конструировании») плотных упаковок оптимального гранулометрического состава заполнителей, в соответствии с которым новые сферы наилучшим образом заполняют промежутки между уже существующими сферами (рис. 4).

Для моделирования структурообразования применяли универсальное массовое распределение частиц по размерам с учетом фрактальности системы [19]:

$$m(r) \sim r^{-D+2}, \quad (10)$$

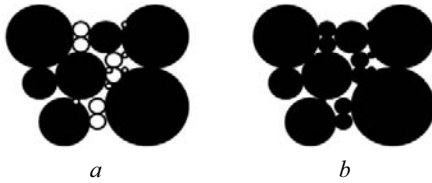


Рис. 4. Модель заполнения межзерновых пустот при получении плотной упаковки дисперсно-зернистой системы: *a, b* — этапы «конструирования» [19]

Fig. 4. A model for the filling of intergranular voids during the formation of a dense packing in a granular system: *a, b* — “construction” stages [19]

где $m(r)$ — массовое распределение частиц по размерам; r — средний размер частиц, мм; D — показатель фрактальной размерности (для исследований применяли $D = 2,3–2,7$).

В ходе моделирования рассчитывали соотношения фракций песка, при которых поровое пространство более крупных зерен заполнялось частицами с меньшим размером. Значения $m(r)$ рассчитывали для средних радиусов $r_{\max} = 3,75$ мм, $r_{\min} = 0,238$ мм. Подставляя полученные значения r_i в уравнение (10), находили долю каждой фракции частиц песка $m(r_i)$ с учетом коэффициента $k_i = m(r_i)/m(r_i)$. Произведение коэффициентов на содержание фракции в песке исходной (природной) гранулометрии давало скорректированное количество каждой фракции песка.

На основании полученных данных в ходе испытаний корректировали гранулометрический состав мелкого заполнителя (природного кварцевого песка Стрелецкого месторождения Воронежской области) и определяли оптимальное соотношение фракций песка по максимальной плотности системы в насыпном ρ_n и уплотненном $\rho_{\text{упл}}$ состоянии при различной фрактальности системы D . Зерновой состав и модуль крупности $M_{\text{кр}}$ заполнителя устанавливали на стандартном наборе сит (ГОСТ 8735–88).

Прочность бетона с использованием фракционированного песка и гранитного щебня (фракции 5–10 мм) определяли по стандартной методике (ГОСТ 10180–2012) на гидравлической испытательной установке INSTRON (модель 1500HDX).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследований сухих систем установлено, что для тонкодисперсных частиц существенно меняются условия и механизмы структурообразования. В отличие от грубодисперсных частиц, преобладающими являются молекулярно-электростатические силы и поверхностные взаимодействия физико-химической природы, способствующие формированию агрегированных фрактально-кластерных структур. С увеличением дисперсности осуществляется структурный переход от отдельных частиц и агрегатов (рис. 5, модель структуры — *I*) к сети взаимосвязанных (перколяционных) фрак-

тальных кластеров (рис. 5 — модель *II*). При этом с увеличением их размеров они становятся более разветвленными и менее плотными, что соотносится с изменением показателей структуры и свойств системы. Установлено, что при дисперсности до $2000 \text{ м}^2/\text{кг}$ формируются системы, характеризующиеся существенными перестроениями: с повышенной кластерной пустотностью $P_c = 86 \%$, меньшим количеством межчастичных контактов $z = 2–3$; плотностью упаковки $\mu = 0,14$, что соотносится со значительным снижением насыпной плотности ρ_n до $350 \text{ кг}/\text{м}^3$ (табл. 1).

Как и ожидалось, рост дисперсности значительно влияет на проявление физико-химической активности минеральных компонентов и определяется природой, свойствами поверхности частиц твердой фазы. При этом наблюдается противоречие: активность в расчете на единицу массы — $\text{г}/\text{кг}$ возрастает, в то же время активность единицы площади поверхности частиц — $\text{г}/\text{м}^2$ снижается (рис. 6). Такое проявление свойств во многом обеспечивается за счет энергетического потенциала частиц в области дисперсности, соответствующей формированию агрегированных фрактально-кластерных систем, что соотносится с изменением структурных показателей (см. рис. 5, табл. 1). Исходя из позиции термодинамики, за счет процессов агрегирования избыточная поверхностная энергия частиц твердой фазы снижается, в результате чего дисперсная система меняет энергетические характеристики и физико-химическую активность в целом.

Полученные данные показали, что при обеспечении требуемых свойств цементных композитов важно на начальной стадии для связнодисперсных (сухих) систем использовать максимальный потенциал минеральных компонентов. С увеличением дисперсности меняются условия структурообразования, что может приводить как к улучшению свойств, так и к нежелательным эффектам: увели-

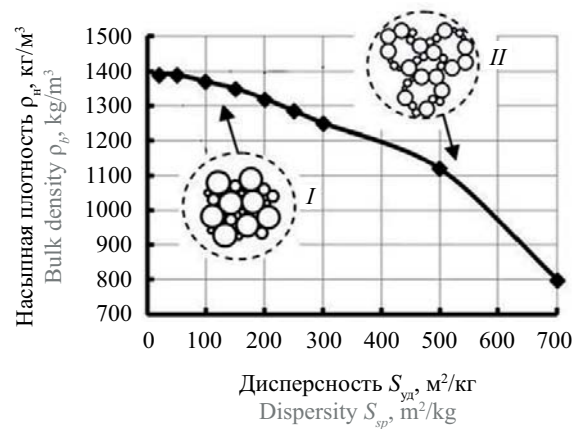


Рис. 5. Зависимость насыпной плотности от дисперсности песка: *I, II* — модели структур

Fig. 5. The relationship between bulk density and sand particle size distribution: *I, II* — structural models

Табл. 1. Показатели структуры и свойств сухих дисперсных систем

Table 1. Indicators of the structure and properties of dry dispersed systems

Минеральный компонент Mineral component	Показатели структуры и свойств Structure factor and properties				
	Дисперсность $S_{уд}$, м ² /кг Dispersity S_{sp} , m ² /kg	Межкластерная пустотность P_c , % Intercluster void fraction P_c , %	Плотность упаковки μ Package density μ	Координационное число z Coordination number z	Насыпная плотность ρ_n , кг/м ³ Bulk density ρ_b , kg/m ³
Песок Sand	300	52	0,48	5–6	1250
	500	58	0,42	4–5	1100
	700	70	0,30	3–4	800
Биокремнезем Biosilica	2000	86	0,14	2–3	350

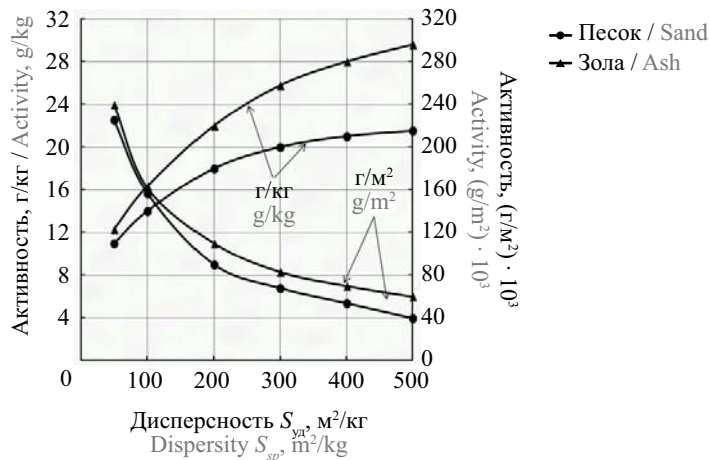


Рис. 6. Зависимость физико-химической активности (по поглощению извести) от дисперсности минеральных компонентов

Fig. 6. The relationship between physicochemical activity (as measured by lime absorption) and the fineness of mineral components

чению водопотребности, повышению расхода ПАВ на диспергирование, замедлению сроков схватывания и ухудшению свойств цементных композитов. Применение компонентов с дисперсностью выше определенных значений нецелесообразно и с позиции технико-экономической эффективности. С учетом особенностей структурообразования, проявления свойств и физико-химической активности актуально применение минеральных компонентов с рациональными значениями дисперсности, обеспечивающими улучшение физико-технических свойств цементных композитов и бетонов.

В обводненных системах фрактально-кластерные структуры сохраняются за счет капиллярно-плёночных взаимодействий на границе раздела фаз, однако меняется вид их геометрического построения при внешних воздействиях. Исходя из модельных представлений, с ростом напряжений сдвига в микрогетерогенной составляющей смесей проявляется «кластерный» характер структурообразова-

ния и изменения свойств, отличающийся от классических положений реологии дисперсных систем (рис. 7). При значениях напряжений больше предельного напряжения сдвига τ_0 отмечается первоначальное снижение «эффективной» вязкости $\eta_{эфф}$ за счет разрушения перколяционного фрактального кластера на отдельные агрегаты (рис. 7, а, участок кривой 1–2). Минимальные значения вязкости $\eta_{эффmin}$ проявляются при разрушении межагрегатных связей (рис. 7, а, участок 2–3). При дальнейшем росте напряжений происходит полный разрыв связей с формированием мелких кластеров и отдельных частиц, что приводит к повышению внутреннего трения и увеличению вязкости (рис. 7, а, участок 3–4). Дальнейший рост напряжений вновь приводит к снижению вязкости за счет разрыва сплошности дисперсии (рис. 7, а, участок 4–5).

Результаты экспериментальных исследований, представленные на рис. 8, соотносятся с модельными представлениями о механизме структурно-

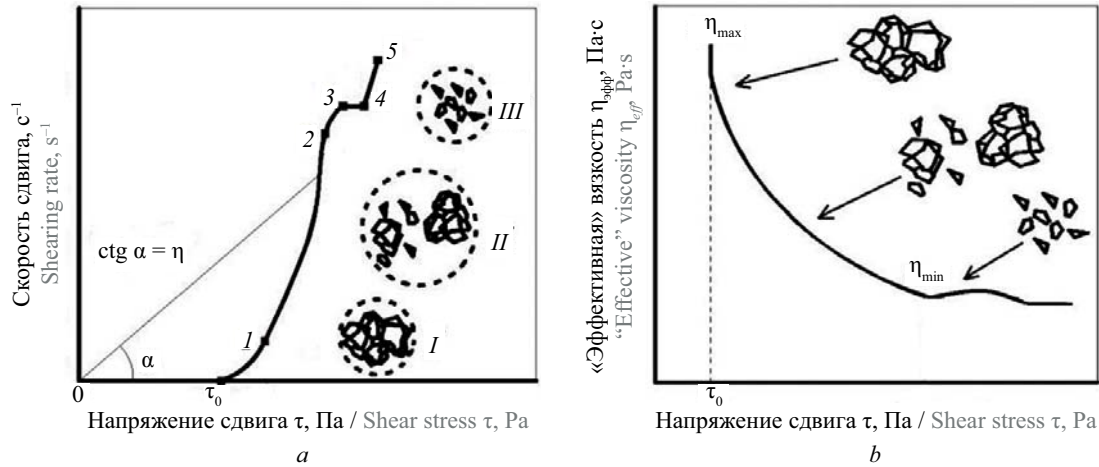


Рис. 7. Модельные зависимости скорости сдвига (а) и «эффективной» вязкости (б) от напряжения сдвига: I, II, III — модели структур

Fig. 7. Model dependencies of shear rate (a) and 'effective' viscosity (b) on shear stress: I, II, III — structural models

реологического поведения обводненных дисперсий с учетом фрактально-кластерных процессов формирования и разрушения агрегированной структуры в условиях изменяемого напряжения сдвига. Установлено наличие участков нелинейного изменения вязкости при высоких значениях напряжений сдвига. Особенности механизма структурообразования также подтверждаются результатами оптических исследований на примере системы «песок – вода» (рис. 9).

На основе анализа экспериментальных данных (см. рис. 8) и моделирования на основе зависимости (4) оценено влияние свойств частиц твердой фазы на изменение показателей структуры дисперсных систем. Обобщенные данные представлены в табл. 2, 3.

Установлена взаимосвязь реологических показателей τ_0 и $\eta_{эфф\min}$ с показателями структуры на микро-

уровне — концентрацией кластеров φ^* и фрактальностью D (табл. 2). Показано, что закономерный рост τ_0 и $\eta_{эфф\min}$ при увеличении дисперсности с 300 до 700 м²/кг является следствием изменения характера формирующихся фрактально-кластерных структур в масштабах отдельных частиц и агрегатов при повышении значений φ^* с 0,65 до 0,87. При этом меняется вид геометрического построения обводненной системы при уменьшении показателя D с 2,7 до 2,45, соответствующего формированию более разветвленной микроструктуры с понижением плотности системы ρ_v с 2004 до 1910 кг/м³.

Также установлено, что процессы структурообразования в значительной степени определяются видом, строением и фрактальными свойствами поверхности частиц твердой фазы. Это проявляется в изменении реологических свойств: τ_0 увеличивается с 58 Па для системы «песок –

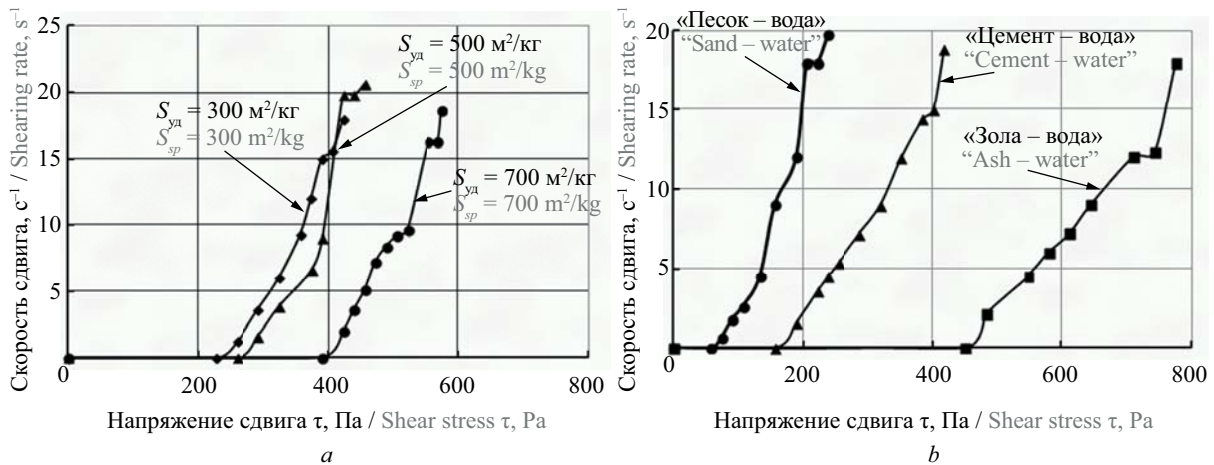


Рис. 8. Экспериментальные зависимости скорости сдвига от напряжения сдвига: а — для песка различной дисперсности при В/Т = 0,28; б — для различных систем при В/Т = 0,32; S_{уд} = 500 м²/кг

Fig. 8. Experimental relationships between shear rate and shear stress: а — for sand of various dispersity at W/S = 0.28; б — for various systems at W/S = 0.32; S_{sp} = 500 м²/kg

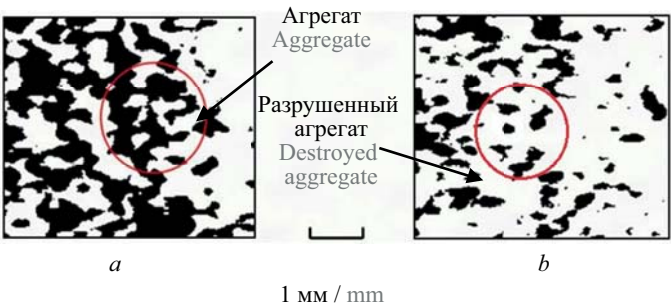


Рис. 9. Изменение структуры системы «песок – вода» (×10): *a* — в покое; *b* — при сдвиге
Fig. 9. Structural change of system “sand – water” (×10): *a* — at rest; *b* — under shear

Табл. 2. Показатели структуры и свойств системы «песок – вода» при различной дисперсности (В/Т = 0,28)
Table 2. Structure factor and properties of system “sand – water” at various dispersity (W/S = 0.28)

Показатели структуры и свойств Structure factor and properties	Дисперсность $S_{уд}$, м ² /кг / Dispersity S_{sp} , m ² /kg		
	300	500	700
Критическая концентрация кластеров φ^* Critical concentration of clusters φ^*	0,65	0,73	0,87
Показатель фрактальности системы D Index fractal of system D	2,7	2,65	2,45
Предельное напряжение сдвига τ_0 , Па Limiting shear stress τ_0 , Pa	226	258	389
«Эффективная» вязкость $\eta_{эффmin}$, Па·с “Effective” viscosity η_{effmin} , Pa·s	21	23	31
Плотность обводненной системы ρ_w , кг/м ³ Water system denseness ρ_w , kg/m ³	2004	1997	1910

Табл. 3. Показатели структуры и свойств различных дисперсных систем (В/Т = 0,32; $S_{уд}$ = 500 м²/кг)
Table 3. Structure factor and properties of various disperse systems (W/S = 0.32; S_{sp} = 500 m²/kg)

Показатели структуры и свойств Structure factor and properties	Вид системы / System sort		
	«Песок – вода» “Sand – water”	«Цемент – вода» “Cement – water”	«Зола – вода» “Ash – water”
Критическая концентрация кластеров φ^* Critical concentration of clusters φ^*	0,72	0,71	0,84
Показатель фрактальности системы D Index fractal of system D	2,61	2,57	2,31
Показатель фрактальности частиц D^* Index fractal of corpuscle D^*	1,58	1,35	1,22
Предельное напряжение сдвига τ_0 , Па Limiting shear stress τ_0 , Pa	58	156	466
«Эффективная» вязкость $\eta_{эффmin}$, Па·с “Effective” viscosity η_{effmin} , Pa·s	11	22	38
Плотность обводненной системы ρ_w , кг/м ³ Water system denseness ρ_w , kg/m ³	1967	1970	1478

вода» до 466 Па для системы «зола – вода»; $\eta_{эффmin}$ увеличивается с 11 до 38 Па·с для этих же систем (см. рис. 8, *b* и табл. 3). Результаты оптических исследований (рис. 10) и моделирования позволили установить взаимосвязь показателя фрактальности поверхности частиц D^* с показателем фрактальности обводненных систем на микроуровне D . Определено, что тонкодисперсные частицы золы, характеризующиеся более развитой и неоднородной

поверхностью с наименьшими значениями показателя $D^* = 1,22$, способствуют формированию обводненной системы с более разветвленной и менее плотной фрактально-кластерной структурой $D = 2,31$, $\rho_w = 1478$ кг/м³ по сравнению с системой, включающей частицы песка $D = 2,61$, $\rho_w = 1967$ кг/м³ (табл. 3).
На следующем этапе исследований наполненных цементных композитов проведен структурно-феноменологический анализ взаимосвязи показателя

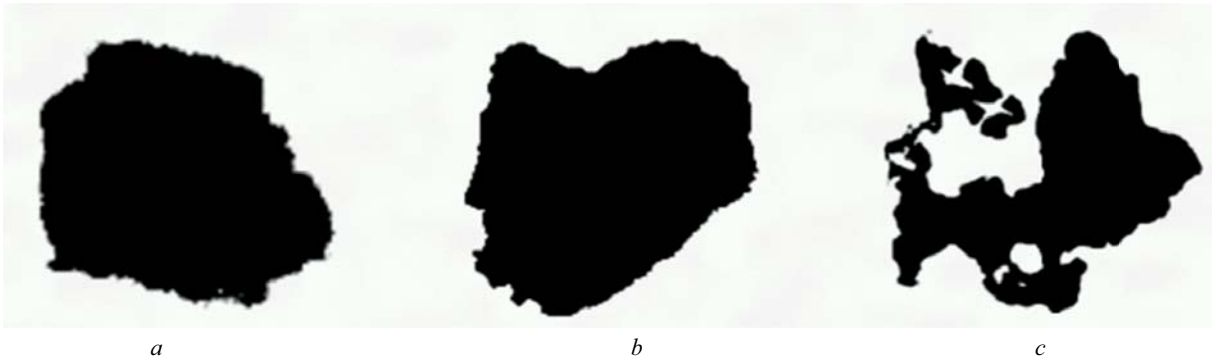


Рис. 10. Изображение проекций частиц ($\times 400$): *a* — цемента; *b* — песка; *c* — золы; $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$
Fig. 10. Visualization of particle trajectories ($\times 400$): *a* — cement; *b* — sand; *c* — ash; $S_{sp} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$

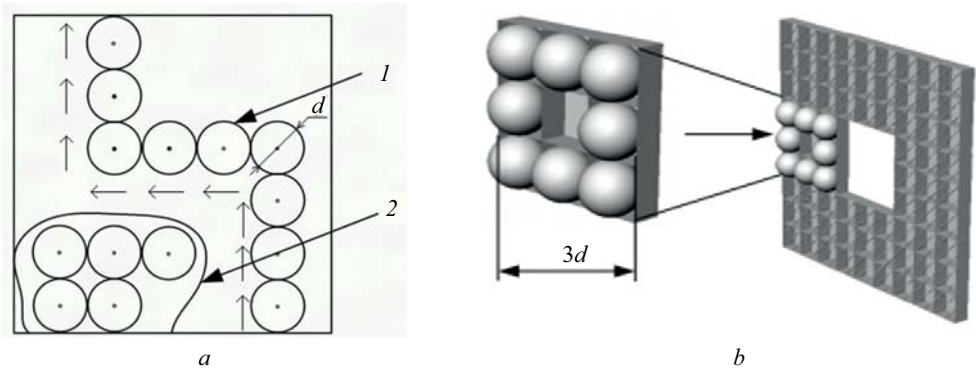


Рис. 11. Плоская решетчатая модель (*a*) и 3D-модель (*b*) протекания по касающимся сферам: *1* — «бесконечный» кластер; *2* — отдельный кластер [1]
Fig. 11. A flat lattice model (*a*) and a 3D model (*b*) of flow along tangent spheres: *1* — “infinite” cluster; *2* — discrete cluster [1]

телей структуры и свойств фрактально-кластерных систем в рамках теории протекания. Исходя из модельных положений (рис. 11) [1], при увеличении концентрации минеральных компонентов из первоначально формирующихся отдельных кластеров образуется сеть взаимосвязанных кластеров, заполняющих объем системы. Вблизи пороговой вероятности протекания $v_c = 0,076\text{--}0,16$, ранее вычисленной для модельных систем, при определенном топологи-

ческом распределении частиц реализуются условия для формирования непрерывного «бесконечного» (перколяционного) фрактального кластера — каркаса микроструктуры, определяющего свойства композита.

В ходе экспериментальных исследований выполнили компьютерное моделирование с определением показателей структуры (рис. 12). Обобщенные результаты оценки показателей структуры и свойств приведены на рис. 13 и в табл. 4. Установлено, что наибольшими показателями прочности обладают композиты с объемным содержанием минерального компонента $v_c = 0,06\text{--}0,15$, близким к значениям порога протекания. Сходимость экспериментальных и вычисленных показателей на модельных системах подтверждает представленный механизм формирования структуры.

В реальных композитах структурообразование дополняется влиянием состава, дисперсности, свойств поверхности частиц, физико-химической активности. По прочностным показателям установлено, что эффективность компонентов с более высокой физико-химической активностью — золы и ультрадисперсного биокремнезема сопоставима или даже меньше по сравнению с песком (рис. 13, табл. 4). Можно предположить, что более высокие

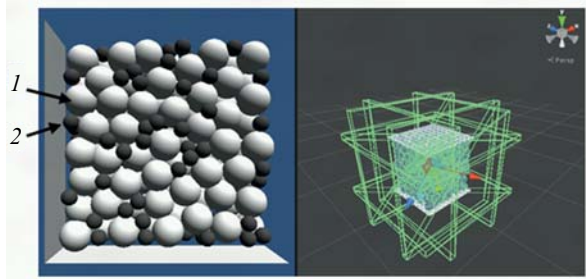


Рис. 12. Фрагмент компьютерного 3D-моделирования топологического распределения частиц: *1* — цемент; *2* — минеральный компонент
Fig. 12. A section of a computer-generated 3D model showing the topological distribution of particles: *1* — cement; *2* — mineral component

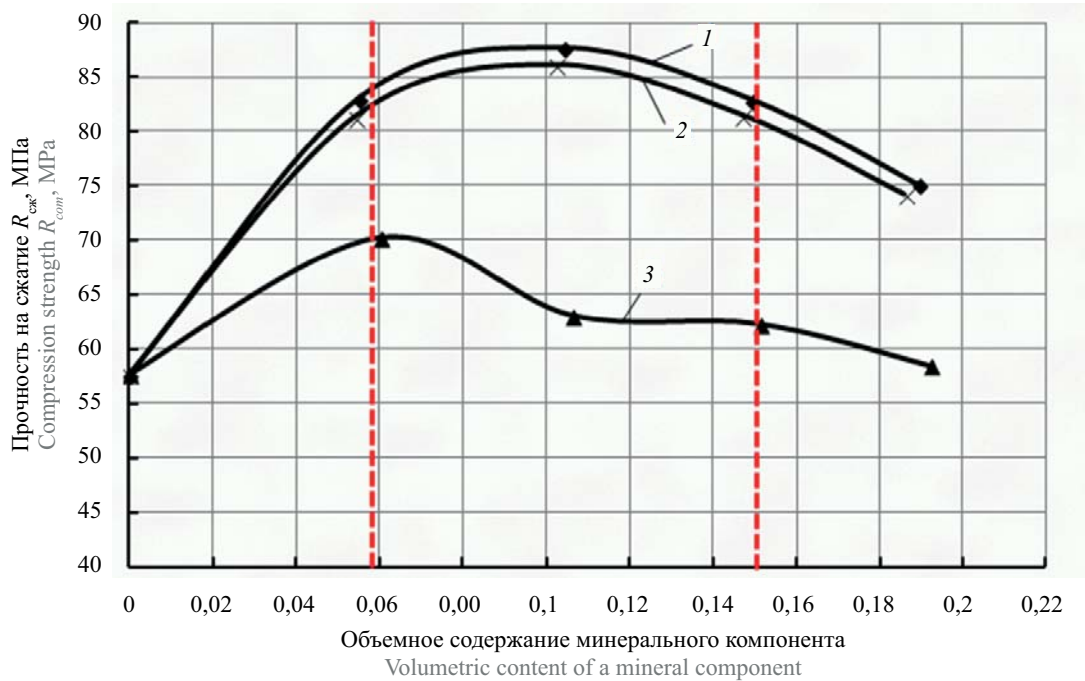


Рис. 13. Влияние вида и объемного содержания минерального компонента на прочность цементного композита: 1 — песок; 2 — биокремнезем; 3 — зола

Fig. 13. The effect of the type and volume content of the mineral component on the strength of the cement composite: 1 — sand; 2 — biosilica; 3 — ash

Табл. 4. Показатели структуры и свойств дисперсных компонентов и цементных композитов на их основе

Table 4. Characteristics of the structure and properties of dispersed components and cement composites based on them

Минеральный компонент Mineral component	Показатели структуры дисперсных компонентов Structure factor of dispersible components		Показатели структуры цементного композита Structure factor of a cement composite		Прочность $R_{сж}$, МПа Strength R_{com} , МПа
	Плотность упаковки μ Package density μ	Координационное число z Coordination number z	Порог протекания v_c Passing threshold v_c	Соотношение частиц в композите c Relationship of corpuscles in composite c	
Песок 700 м ² /кг Sand 700 m ² /kg	0,30	3–4	0,06–0,15	1–2	88
Зола 700 м ² /кг Ash 700 m ² /kg	0,30	3–4	0,06–0,10	1–2	70
Биокремнезем 2000 м ² /кг Biosilica 2,000 m ² /kg	0,14	2–3	0,06–0,15	10–12	86

значения прочности композита с песком, по сравнению с золой, при относительно равных показателях структуры дисперсных компонентов ($\mu = 0,30$; $z = 3-4$; $c = 1-2$) обусловлены влиянием свойств поверхности частиц твердой фазы. Это соотносится с данными исследования сухих и обводненных систем.

Для композита с биокремнеземом формируемый системообразующий каркас из частиц микронаполнителя в виде первоначального перколяционного фрактального кластера характеризуется существенными изменениями показателей структуры ($\mu = 0,14$; $z = 2-3$; $c = 10-12$), соответствующих более высокой

пустотности и низкой плотности на микроуровне, что также сказывается на прочности затвердевшего композита (табл. 4).

Проведенные электронно-микроскопические исследования позволили получить количественные данные показателей структуры и свойств цементных композитов, включающих комплексные добавки на основе минеральных компонентов и ПАВ. Обобщенная информация результатов испытаний представлена на рис. 14, 15 и в табл. 5.

Установлено, что для цементного композита, включающего комплексную добавку на основе песка,

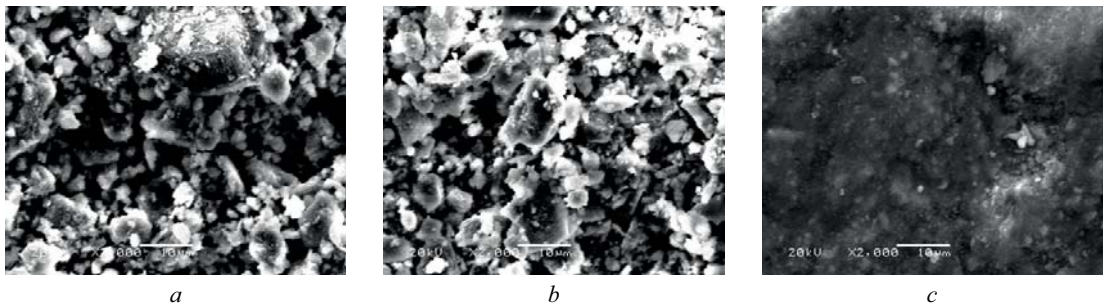
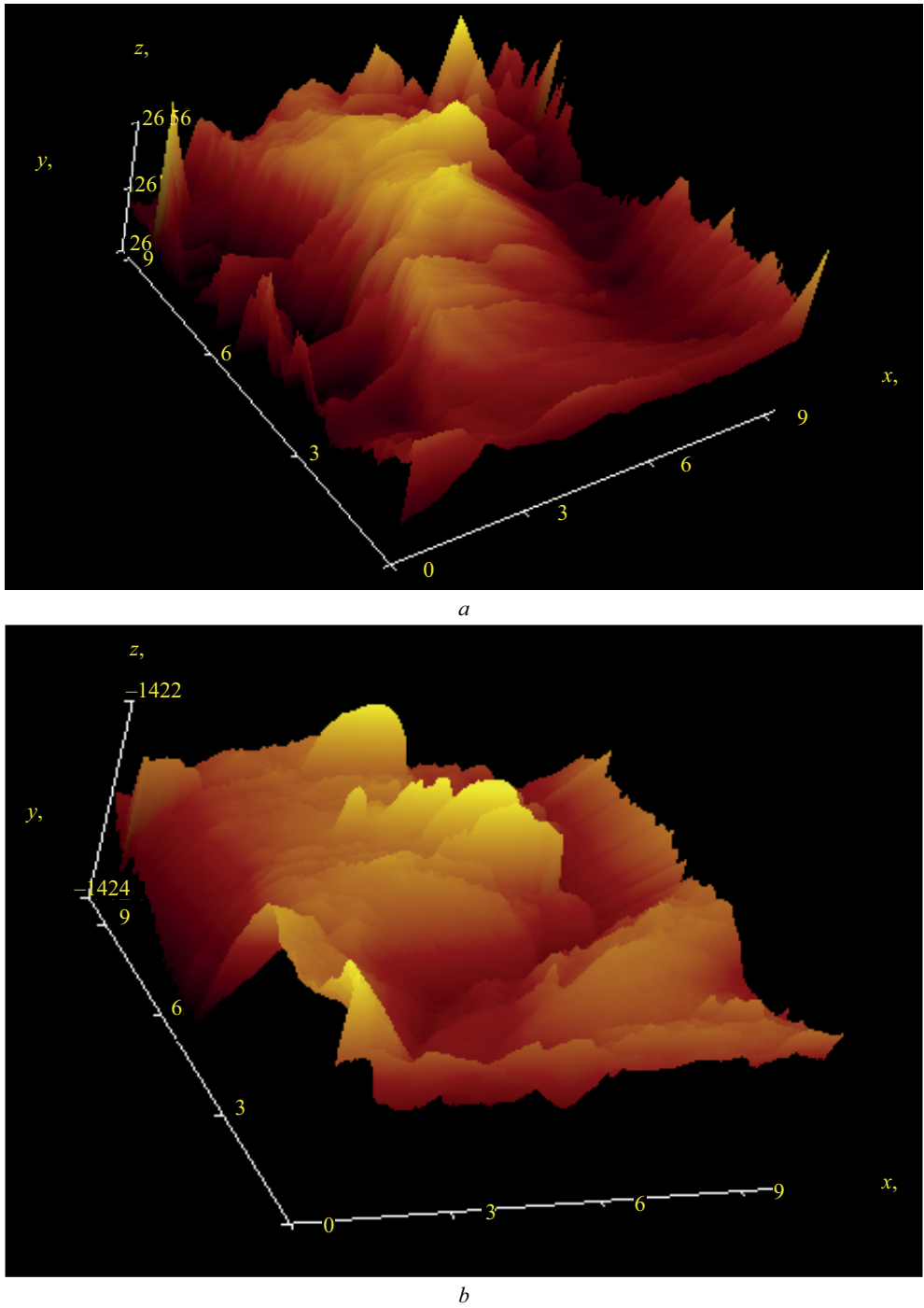


Рис. 14. Микроструктура цементных композитов (×2000): *a* — без добавок; *b* — с комплексной добавкой (зола + ПАВ); *c* — с комплексной добавкой (песок + ПАВ)

Fig. 14. Microscopic structure of cement composite (×2,000): *a* — without additives; *b* — with a complex of additive (ash + surfactant); *c* — with a complex of additive (sand + surfactant)



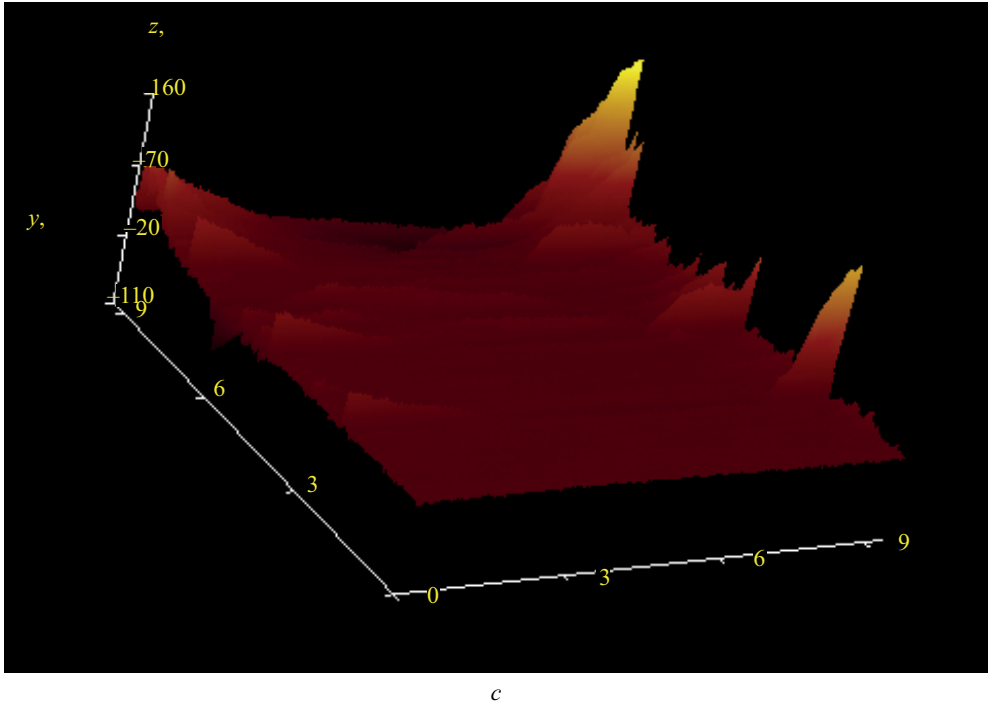


Рис. 15. Микроструктура «среза» поверхности цементных композитов (размерности по осям x – y — мкм, z — нм): a — без добавок; b — с комплексной добавкой (зола + ПАВ); c — с комплексной добавкой (песок + ПАВ)

Fig. 15. Microstructure of a cross-section of the surface of cement composites (dimensions along the x – y axes: μm ; z : nm): a — without additives; b — with a composite additive (ash + surfactant); c — with a composite additive (sand + surfactant)

визуально характерна более упорядоченная, однородная структура на микроуровне с наибольшим показателем фрактальности $D = 1,85$, по сравнению с композитами на основе золы $D = 1,62$ и без добавок $D = 1,43$ (см. рис. 14, табл. 5). Показатель фрактальности D количественно характеризует топологическое строение микроструктуры композита и соотносится с его физико-механическими характеристиками. Чем выше значения данного показателя и ближе к $D = 2$, тем более равномерно распределены элементы твердой фазы затвердевшей фрактально-кластерной системы, соответственно формируемая микроструктура композита более плотная и прочная. Также по сведениям атомно-силовой микроскопии установлена взаимосвязь характеристик микро-

структуры, оцениваемых по показателю микрошероховатости поверхности s , косвенно связанному с фрактальностью. Выявлено, что более однородная с меньшей шероховатостью $s = 0,16$ мкм микроструктура поверхности соответствует более плотной и прочной системе композита с наибольшим показателем фрактальности D (см. рис. 15, табл. 5).

Таким образом, проведенный структурно-феноменологический анализ сухих, обводненных и затвердевших дисперсных систем позволил расширить представления о механизме формирования их микроструктуры, а также установить количественные зависимости между труднонаблюдаемыми фрактально-кластерными процессами структурообразования и свойствами с учетом дис-

Табл. 5. Показатели структуры и свойств затвердевших цементных композитов, включающих комплексные добавки

Table 5. Properties and microstructure of hardened cement composites incorporating complex additives

Минеральный компонент комплексной добавки Mineral component of the complex additive	Показатели структуры и свойств / Structure factor and properties			
	Фрактальность D Index fractal D	Микрошероховатость s , мкм Microcoarseness s , mcm	Плотность ρ , кг/м ³ Density ρ , kg/m ³	Прочность $R_{сж}$, МПа Strength R_{com} , MPa
Без добавок Without additives	1,43	2,60	2070	57
Зола 700 м ² /кг Ash 700 m ² /kg	1,62	1,40	2200	94
Песок 700 м ² /кг Sand 700 m ² /kg	1,85	0,16	2280	135

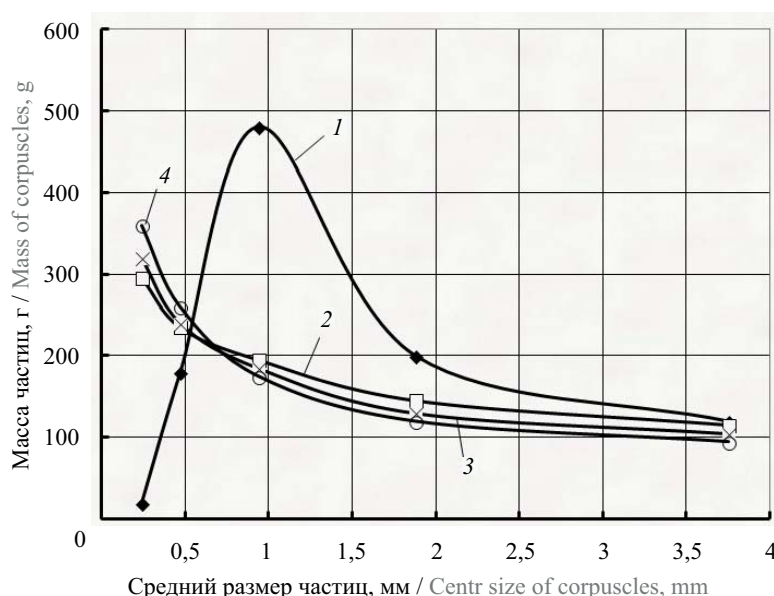


Рис. 16. Распределение частиц песка по размерам: 1 — природная гранулометрия; 2, 3, 4 — скорректированная гранулометрия при $D = 2,3; 2,5; 2,7$

Fig. 16. Particle size distribution of sand: 1 — natural particle size distribution; 2, 3, 4 — corrected particle size distribution at $D = 2.3; 2.5; 2.7$

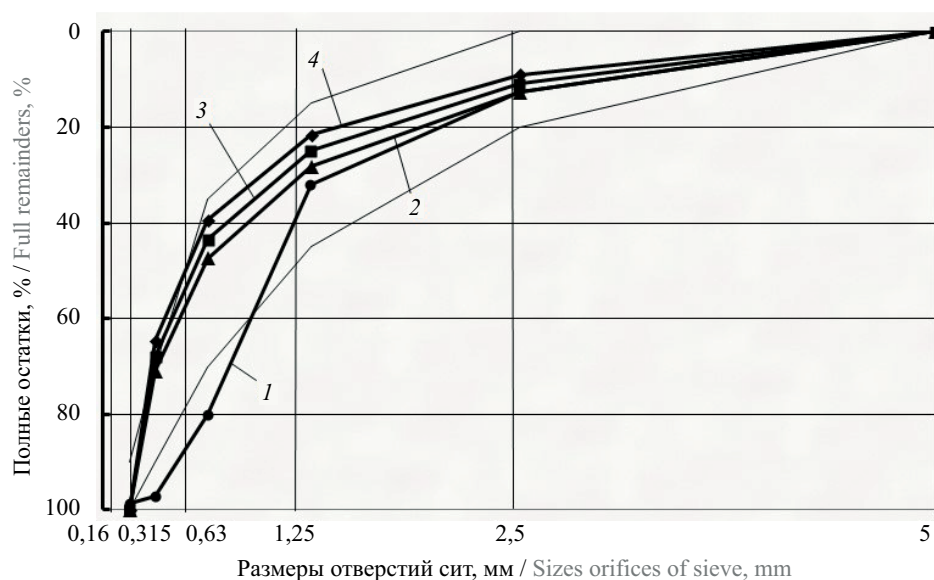


Рис. 17. Зерновой состав песка: 1 — природная гранулометрия; 2, 3, 4 — скорректированная гранулометрия при $D = 2,3; 2,5; 2,7$

Fig. 17. Grain size distribution of sand: 1 — natural grain size distribution; 2, 3, 4 — corrected grain size distribution at $D = 2.3; 2.5; 2.7$

перности и характеристик поверхности частиц твердой фазы минеральных компонентов. Результаты исследований и оценки эффективности минеральных компонентов стали основой для разработки составов и технологии комплексных органоминеральных добавок для бетонов.

При структурообразовании цементных бетонов к рассмотренным системообразующим процессам микроуровня добавляются эффекты и явления мезо-

и макроуровней, связанные с инерционными (массогабаритными) характеристиками грубодисперсных систем — формой, размерами, гранулометрией частиц заполнителей. В рамках исследований решалась задача формирования эффективных (более плотных) структур частиц заполнителей. Опираясь на модельные зависимости массового распределения частиц по размерам (10), реализован метод последовательного заполнения межзерновых пустот для получения

Табл. 6. Зависимости плотности песка от показателя фрактальности D
Table 6. The relationship between sand density and the fractal exponent D

Вид granulometрии Granulometry sort	$M_{кр} / M_c$	Виды плотности, кг/м³ / Denseness sorts, kg/m³	
		Насыпная плотность ρ_n Bulk density ρ_b	В уплотненном состоянии $\rho_{упл}$ In a dense condition ρ_{com}
Природная / Natural	3,20	1546	1695
$D = 2,3$	2,60	1565	1740
$D = 2,4$	2,45	1570	1750
$D = 2,5$	2,34	1580	1762
$D = 2,6$	2,23	1565	1754
$D = 2,7$	2,20	1555	1745

плотной упаковки дисперсно-зернистой системы с различными показателями фрактальности в диапазоне $D = 2,3-2,7$.

Результаты определения массового распределения частиц по размерам и зернового состава песка природной и скорректированной granulometрии при различных значениях показателя фрактальности D приведены на рис. 16, 17. В табл. 6 представлены результаты установления плотности песка при различных значениях D .

Установлено, что природный песок имеет granulometрию, близкую к нормальной, соответствующей нормативно-техническим требованиям (см. рис. 17, кривая 1). При этом скорректированный granulometрический состав песков попадает в область допустимых значений при всех показателях фрактальности системы D (кривые 2–4). Наибольшая плотность песка (насыпная и в уплотненном состоянии) получена при показателе $D = 2,5$ (см. табл. 6). Увеличение плотности упаковки скорректированного granulometрического состава достигается за счет формирования структуры, в которой в пустотах между крупными частицами размещаются более мелкие частицы без их раздвижки. В пределах размеров частиц песка данный эффект наблюдается на всех масштабных уровнях. Полученные результаты дают возможность применения песков с «искусственной» granulometрией для получения высокоподвижных бетонных смесей, более устойчивых к внешним воздействиям и расслоению.

Экспериментально установлено, что применение мелкого заполнителя со скорректированной granulometрией совместно с гранитным щебнем фракции 5–10 мм позволило получить бетоны, модифицированные комплексной органоминеральной добавкой, с улучшенными физико-механическими свойствами — прочностью до 90 МПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснованы направления развития методологии исследований на основе системного подхода, отличающегося применением модели фрактальных кластеров для анализа и установления количественных закономерностей между показателями структуры и свойствами цементных композитов

на различных масштабных уровнях и этапах структурообразования.

Структурно-феноменологический анализ взаимосвязи формирования микроструктуры сухих, обводненных дисперсных систем и затвердевших цементных композитов дал возможность уточнить и дополнить представления о механизме формирования их структуры. При сопоставлении данных моделирования, топологии распределения частиц в наполненных системах, а также электронных изображений структуры определены количественные зависимости между фрактально-кластерными процессами структурообразования и свойствами с учетом дисперсности, природы и характеристик поверхности частиц твердой фазы минеральных компонентов.

Применение метода исследования взаимосвязи показателей структуры на мезо- и макроуровнях и свойств дисперсно-зернистых систем, основанного на геометрическом моделировании («конструировании») плотных упаковок, позволило скорректировать granulometрический состав заполнителей для получения более плотной структуры бетона.

Реализованные методические подходы по установлению закономерности показателей структуры и свойств с учетом фрактально-кластерных процессов на различных масштабных уровнях и этапах позволяют расширить существующие возможности управления структурообразованием и прогнозирования формирующихся структур, что дает возможность целенаправленно подойти к выбору компонентов для регулирования свойств цементных композитов и бетонов. На основании системного рассмотрения процессов формирования структуры от микро- до макроуровня с оценкой эффективности минеральных компонентов в составе органоминеральных добавок, а также оптимизации granulometрического состава заполнителей получены цементные бетоны с улучшенными физико-механическими характеристиками.

Дальнейшие исследования в рамках представленных направлений развития методологии управления структурообразованием предусматривают совершенствование существующих, а также разработку перспективных составов и технологий строительных композитов различного функционального назначения с оценкой их технико-экономической эффективности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеева Е.В., Бобрышев А.Н., Воронов П.В., Головинский П.А., Лахно А.В., Перцев В.Т. Структурно-реологические свойства дисперсно-зернистых систем : монография. Воронеж : ВГАСУ, 2010. EDN QNOZJR.
2. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Дондуков В.Г. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 4–10. EDN ZWUFVB.
3. Калашиников В.И., Тараканов О.В. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения // Строительные материалы. 2017. № 1–2. С. 62–67. EDN XXHNSZ.
4. Alatawna A., Birenboim M., Nativ R., Buzaglo M., Peretz-Damari S., Peled A. et al. The effect of compatibility and dimensionality of carbon nanofillers on cement composites // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 232. P. 117141. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117141
5. Pan G., Li P., Chen L., Liu G. A study of the effect of rheological properties of fresh concrete on shotcrete-rebound based on different additive components // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 224. Pp. 1069–1080. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.060
6. Hedayatinia F., Delnavaz M., Emamzadeh S.S. Rheological properties, compressive strength and life cycle assessment of self-compacting concrete containing natural pumice pozzolan // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 206. Pp. 122–129. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.059
7. Syntsov A.P., Shchesnyak E.L., Galishnikova V.V., Fediuk R.S., Stashevskaya N.A. Effect of nano-modified additives on properties of concrete mixtures during winter season // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 237. P. 117527. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117527
8. Ashwini R.M., Potharaju M., Srinivas V., Kanaka D.S., Rathnamala G.V., Paudel A. Compressive and flexural strength of concrete with different nanomaterials : a critical review // Journal of Nanomaterials. 2023. Vol. 2023. Pp. 1–15. DOI: 10.1155/2023/1004597
9. Ndahirwa D., Zmatou H., Lenormand H., Leblanc N. The role of supplementary cementitious materials in hydration, durability and shrinkage of cement-based materials, their environmental and economic benefits : a review // Cleaner Materials. 2022. Vol. 5. P. 100123. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100123
10. Lee J., Lothenbach B., Moon J. Performance improvement of Portland-limestone cement by mechanochemical activation // Cement and Concrete Research. 2024. Vol. 176. P. 107411. DOI: 10.1016/j.cemconres.2023.107411
11. Wang A., Pan Y., Zhao J., Liu P., Wang Y., Chu Y. et al. Research progress of resourceful and efficient utilization of coal gangue in the field of building materials // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 99. P. 111526. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.111526
12. Алфимова Н.И., Шадский Е.Е., Никифорова Н.А. Эффективность использования органоминерального модификатора на основе вулканогенно-осадочных пород // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. № 2 (17). С. 120–128. EDN UBCXGV.
13. Тараканов О.В., Акчурун Т.К., Утюгова Е.С. Эффективность применения комплексных органоминеральных добавок для бетонов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 1 (78). С. 174–181. EDN SBKZAG.
14. Ткач Е.В., Рахимов М.А., Тоимбаева Б.М., Рахимова Г.М. Влияние органоминерального модификатора на физико-механические и деформативные свойства бетона // Фундаментальные исследования. 2012. № 3–2. С. 428–431. EDN PBAOWR.
15. Нгуен Тхе Винь Т.В., Нгуен Динь Чинь Д.Ч., Баженов Ю.М. Разработка органоминеральных модификаторов для получения высокопрочных бетонов с компенсированной усадкой // Вестник МГСУ. 2012. № 1. С. 72–76. EDN PCITEL.
16. Zhang S., Qiao W.-G., Chen P.-C., Xi K. Rheological and mechanical properties of microfine-cement-based grouts mixed with microfine fly ash, colloidal nanosilica and superplasticizer // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 212. Pp. 10–18. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.314
17. Володин В.В., Тараканов О.В., Низина Т.А., Кяшкин В.М., Балыков А.С. Гидратация цементных вяжущих с минеральными добавками на основе глинистых и карбонатных пород // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 8. С. 1317–1327. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1317-1327. EDN AOVNKP.
18. Королев Е.В., Гришина А.Н., Айзеницадт А.М. Анализ структурообразования композитов с использованием фрактальной размерности // Строительные материалы. 2020. № 9. С. 54–61. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-784-9-54-61. EDN FMNDZB.
19. Усачев С.М., Перцев В.Т. Совершенствование технологии вибропрессованных бетонов : монография. Воронеж : ВГАСУ, 2007. 142 с. EDN QNNHFP.
20. Головинский П.А., Ушаков И.И. Теория фрактального роста трещин и сопутствующая акустическая эмиссия // Сборник тезисов ФиПС. 1999. С. 20–24.

Поступила в редакцию 26 сентября 2025 г.

Принята в доработанном виде 30 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 13 февраля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Андрей Александрович Леденев** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский центр (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил); **Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) (ВУНЦ ВВС «ВВА»);** 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 А; РИНЦ ID: 608032, ORCID: 0000-0003-2493-8952; ledenoff@mail.ru;

Виктор Тихонович Перцев — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций; **Воронежский государственный технический университет (ВГТУ);** 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84; РИНЦ ID: 177365, ORCID: 0000-0002-8882-4930; peres_v@mail.ru.

Вклад авторов:

Леденев А.А. — концепция исследования, развитие методологии, выполнение экспериментов, анализ и обработка результатов, подготовка текста, итоговые выводы.

Перцев В.Т. — научное консультирование.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Alekseeva E.V., Bobryshev A.N., Voronov P.V., Golovinsky P.A., Lahno A.V., Pertsev V.T. *Structural and rheological properties of dispersed-granular systems : monography.* Voronezh, VGASU, 2010. EDN QNOZJR. (rus.).
2. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Dondukov V.G. Cements and additives for producing high-strength concretes. *Construction Materials.* 2017; 11:4-10. EDN ZWUFVB. (rus.).
3. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V. About the use of complex additives in concretes of a new generation. *Construction Materials.* 2017; 1-2:62-67. EDN XXIHSZ. (rus.).
4. Alatawna A., Birenboim M., Nadiv R., Buza-glo M., Peretz-Damari S., Peled A. et al. The effect of compatibility and dimensionality of carbon nanofillers on cement composites. *Construction and Building Materials.* 2020; 232:117141. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117141
5. Pan G., Li P., Chen L., Liu G. A study of the effect of rheological properties of fresh concrete on shotcrete-rebound based on different additive components. *Construction and Building Materials.* 2019; 224:1069-1080. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.060
6. Hedayatinia F., Delnavaz M., Emamzadeh S.S. Rheological properties, compressive strength and life cycle assessment of self-compacting concrete containing natural pumice pozzolan. *Construction and Building Materials.* 2019; 206:122-129. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.059
7. Svintsov A.P., Shchesnyak E.L., Galishnikova V.V., Fediuk R.S., Stashevskaya N.A. Effect of nano-modified additives on properties of concrete mixtures during winter season. *Construction and Building Materials.* 2020; 237:117527. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117527
8. Ashwini R.M., Potharaju M., Srinivas V., Kana-ka D.S., Rathnamala G.V., Paudel A. Compressive and flexural strength of concrete with different nanomaterials : a critical review. *Journal of Nanomaterials.* 2023; 2023:1-15. DOI: 10.1155/2023/1004597
9. Ndahirwa D., Zmamou H., Lenormand H., Leb-lanc N. The role of supplementary cementitious materials in hydration, durability and shrinkage of cement-based materials, their environmental and economic benefits : a review. *Cleaner Materials.* 2022; 5:100123. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100123
10. Lee J., Lothenbach B., Moon J. Performance improvement of Portland-limestone cement by mech-anochemical activation. *Cement and Concrete Re-search.* 2024; 176:107411. DOI: 10.1016/j.cemconres.2023.107411
11. Wang A., Pan Y., Zhao J., Liu P., Wang Y., Chu Y. et al. Research progress of resourceful and efficient utilization of coal gangue in the field of building materials. *Journal of Building Engineering.* 2025; 99:111526. DOI: 10.1016/j.job.2024.111526
12. Alphonsova N.I., Shadskii E.E., Nikiphoro-va N.A. Effectiveness of the use of organo-mineral mod-ificator based on the volcanic sediments. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2016; 2(17):120-128. EDN UBCXGV. (rus.).
13. Tarakanov O.V., Akchurin T.K., Utyugova E.S. Efficiency of application of integrated organomineral additives for concretes. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture.* 2020; 1(78):174-181. EDN SBKZAG. (rus.).
14. Tkach E.V., Rakhimov M.A., Toimbaeva B.M., Rakhimova G.M. The effect of the organic-mineral modifier on physical and mechanical deformation prop-erties of the concrete. *Fundamental Research.* 2012; 3-2:428-431. EDN PBAOWR. (rus.).
15. Nguyen The Vinh T.V., Nguyen Dinh Trinh D.T., Bazhenov Yu.M. Development of organic-mineral mod-ifiers to obtain high-strength concrete with shrinkage compensated. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow*

State University of Civil Engineering]. 2012; 1:72-76. EDN PCITEL. (rus.).

16. Zhang S., Qiao W.-G., Chen P.-C., Xi K. Rheological and mechanical properties of microfine-cement-based grouts mixed with microfine fly ash, colloidal nanosilica and superplasticizer. *Construction and Building Materials*. 2019; 212:10-18. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.314

17. Volodin V.V., Tarakanov O.V., Nizina T.A., Kyashkin V.M., Balykov A.S. Hydration of cement binders with mineral additives based on clay and carbonate rocks. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1317-1327.

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1317-1327. EDN AOVNKP. (rus.).

18. Korolev E.V., Grishina A.N., Aizenshtadt A.M. Analysis of structure formation of composites using fractal dimension. *Construction Materials*. 2020; 9:54-61. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-784-9-54-61. EDN FMNDZB. (rus.).

19. Usachev S.M., Pertsev V.T. *Perfection of technology vibration pressing of concretes : monography*. Voronezh, VGASU, 2007; 142. EDN QNNHFP. (rus.).

20. Golovinskij P.A., Ushakov I.I. Theory of fractal growth of shakes and accompanying acoustical emission. *Collection of abstracts FIPS*. 1999; 20-24. (rus.).

Received September 26, 2025.

Adopted in revised form on September 30, 2025.

Approved for publication on February 13, 2026.

B I O N O T E S : **Andrey A. Ledenev** — Candidate of Technical Sciences, Senior Staff Scientist, Research Centre (Problems of Application, Security and Control of Aviation Air Force); **Military Educational and Scientific Centre of the Air Force “N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy” (Voronezh)**; 54 A St. Bolshhevikov st., Voronezh, 394064, Russian Federation; ID RSCI: 608032, ORCID: 0000-0003-2493-8952; ledenoff@mail.ru;

Victor T. Pertsev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology of Building Materials, Products and Structures; **Voronezh State Technical University (VSTU)**; 84, 20 let Oktyabrya st., Voronezh, 394006, Russian Federation; ID RSCI: 177365, ORCID: 0000-0002-8882-4930; perec_v@mail.ru.

Contribution of the authors:

Andrey A. Ledenev — research concept, development of methodology, performance of experiments, analysis and machining of outcomes, next preparation, total conclusions.

Victor T. Pertsev — scientific consultation.

The authors declare that they have no conflict of interest.

Бесцементные вяжущие системы на основе отходов производства глинозема, твердеющие за счет принудительной карбонизации

Александр Сергеевич Бахтин, Николай Владимирович Любомирский,
Тамара Алексеевна Бахтина, Герман Русланович Биленко,
Иван Анатольевич Тюнюков

*Институт «Академия строительства и архитектуры» (структурное подразделение)
Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского (АСиА КФУ им. В.И. Вернадского);
г. Симферополь, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Утилизация отходов производства с получением полезного продукта — один из базовых постулатов концепции устойчивого развития. В связи с этим актуальной задачей являются исследования получения вяжущих веществ и строительных изделий на их основе из отходов металлургических производств, твердеющих в среде углекислого газа за счет его поглощения, приобретая при этом необходимые физико-механические свойства.

Материалы и методы. Основным сырьевым компонентом стал нефелиновый шлам (НФШ) — вторичное сырье, образующееся из нефелиновых концентратов Кольского полуострова при производстве глинозема щелочным способом. Кристаллические фазы анализировали по измерению дифракции рентгеновских лучей (XRD) на дифрактометре Europe 600 (GNR). Термический анализ проводили с помощью анализатора STA8000 (Perkin Elmer). Дисперсный состав нефелинового шлама определяли методом лазерной дифракции на лазерном анализаторе размеров частиц Partica LA-960 (Horiba). Изменение пористости осуществлялось на Automated Standard Porosimeter 3.2 (MPM&P Research Inc). Механические характеристики опытных образцов определяли на автоматической сервогидравлической консоли управления MCC8 в комплекте с программным обеспечением.

Результаты. НФШ состоит не менее чем на 85 % мас. из белита (β - C_2S). Выявлено, что процесс активного поглощения CO_2 нефелиновым шламом наблюдается в первые 120 мин карбонизации. Прочность при сжатии получаемого материала достигает 58 МПа, а после последующей гидратации прочность возрастает до 69 МПа. Рост прочности обусловлен образованием карбоната кальция в карбонизирующей системе. При последующей гидратации образуются гелеобразные продукты гидратации белита, дополнительно упрочняющие карбонизированный материал. С помощью метода эталонной контактной порометрии установлено, что в результате принудительной карбонизации материал уплотняется, общая пористость опытных образцов существенно уменьшается. Определено, что эффективные радиусы пор карбонизированных образцов смещаются в сторону меньших значений, в сравнении с образцами, не подверженными карбонизации, при этом данный процесс протекает в области макропор (0,1–16 мкм).

Выводы. На основе НФШ возможно получение строительных изделий, твердеющих в среде углекислого газа за счет его связывания и последующего процесса гидратации оставшегося белита, с получением материала, обладающего высокими физико-механическими свойствами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нефелиновый шлам, принудительная карбонизация, гидратация, поглощение CO_2 , механические свойства

Благодарности. Работа выполнена в рамках реализации в КФУ им. В.И. Вернадского федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030». Авторы выражают благодарность рецензентам за ценные замечания и дополнения при работе над статьей.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бахтин А.С., Любомирский Н.В., Бахтина Т.А., Биленко Г.Р., Тюнюков И.А. Бесцементные вяжущие системы на основе отходов производства глинозема, твердеющие за счет принудительной карбонизации // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 4. С. 560–576. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.560-576

Автор, ответственный за переписку: Александр Сергеевич Бахтин, aleserba@mail.ru.

Cement-free binder systems based on alumina production waste hardened by forced carbonation

Aleksandr S. Bakhtin, Nikolay V. Lyubomirskiy, Tamara A. Bakhtina,
German R. Bilenko, Ivan A. Tyunyukov

*Institute “Academy of Construction and Architecture” (a structural division)
of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University; Simferopol, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The disposal of industrial waste to produce a useful product is one of the basic tenets of the concept of sustainable development. In this regard, an urgent task is to study the production of binders and building products based on them from waste from metallurgical industries, which harden in the environment of carbon dioxide due to its absorption, while acquiring the necessary physical and mechanical properties.

Materials and methods. The main raw material component was nepheline sludge, a secondary raw material formed from nepheline concentrates of the Kola Peninsula during the production of alumina by the alkaline method. The crystalline phases were analyzed by measuring X-ray diffraction (XRD) on a Europe 600 (GMR) diffractometer. Thermal analysis to determine the mineralogical composition of nepheline sludge and artificial stone based on it was performed using a STA 8000 analyzer (Perkin Elmer). The dispersed composition of the nepheline sludge was determined by laser diffraction on a laser particle size analyzer Partica LA-960 (Horiba). Porosity was changed using the Automated Standard Porosimeter 3.2 (MPM&P Research Inc.). The mechanical characteristics of the prototypes were determined on an automatic servo-hydraulic MCS8 control console complete with software.

Results. Nepheline sludge consists of at least 85 % by weight from belite (β -C₂S). It was revealed that the process of active CO₂ absorption by nepheline sludge is observed in the first 120 minutes of carbonation. The compressive strength of the resulting material reaches 58 MPa, and after subsequent hydration, the strength increases to 70 MPa. The increase in strength is due to the formation of calcium carbonate in the carbonizing system. During subsequent hydration, gel-like hydration products of belite are formed, which additionally strengthen the carbonized material. Using the method of reference contact porosimetry, it was found that as a result of forced carbonation, the material is compacted, and the total porosity of the prototypes is significantly reduced. It is determined that the effective pore radii of carbonized specimens are shifted towards lower values in comparison with specimens not subject to carbonation, while this process takes place in the macropore region (0.1–16 μ m).

Conclusions. Based on nepheline sludge, it is possible to obtain construction products that harden in a carbon dioxide environment due to its binding and subsequent hydration process, to obtain a material with high physical and mechanical properties.

KEYWORDS: nepheline sludge, hydration, forced carbonation, CO₂ absorption, mechanical properties

Acknowledgments. The work was carried out as part of the implementation of the federal university support program "Priority 2030" at the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. The authors would like to thank the reviewers for their valuable comments and additions while working on the article.

FOR CITATION: Bakhtin A.S., Lyubomirskiy N.V., Bakhtina T.A., Bilenko G.R., Tyunyukov I.A. Cement-free binder systems based on alumina production waste hardened by forced carbonation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(4):560-576. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.560-576 (rus.).

Corresponding author: Aleksandr S. Bakhtin, aleserba@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Создание экологичной, безопасной и комфортной среды жизнедеятельности является на сегодняшний момент одним из актуальных мировых трендов, составляющих комплекс мероприятий для «устойчивого развития», нашедших отражение в федеральных и региональных программах развития на ближайшее десятилетие. Рост объемов производственной деятельности человека уже привел к значительным изменениям климата. В соответствии с международными научными и политическими взглядами основная причина повышения среднегодовой температуры атмосферы на 1,5 °C по сравнению с доиндустриальным уровнем вызвана увеличением содержания в атмосфере парниковых газов. Известный факт, что выбросы CO₂ выросли более чем на 400 % с 1950-х гг. в результате роста промышленного производства [1]. Глобальное потепление, вызванное деятельностью человека, привело к многочисленным наблюдаемым изменениям в климатической системе (с высокой степенью достоверности), таким как повышение температуры суши и океана; более частые периоды сильной жары в большинстве районов суши; рост риска засухи в Средиземноморском регионе; увеличение

частоты, интенсивности и количества обильных осадков в нескольких регионах¹.

Основные выбросы антропогенного CO₂ приходятся на энергетическую, транспортную и промышленную отрасли мировой экономики. Доля строительной индустрии в мировых выбросах — 8 %, главным образом от производства портландцемента и других вяжущих веществ [2–5]. В количественном выражении эти объемы составляют на данное время 2,9–3,0 Гт в год. Такие показатели эмиссии CO₂ в промышленном секторе привели к поиску и разработке технологических решений по снижению и связыванию (секвестрации) CO₂ с получением при этом дополнительной продукции.

Также одна из проблем производства портландцемента в настоящее время — это использование большого количества качественного первичного сырья (известняка и глины, которые в некоторых регионах дефицитны) [6]. В попытках решить проблему ограниченности ресурсов ведутся исследования

¹ *Frei T.* Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty // Annex IV: Expert Reviewers of the IPCC Special Report on Global Warming of 1.5 °C. 2018.

в разных направлениях: разработка портландцементов из различных отходов, применение дополнительных цементирующих материалов, частичная замена портландцементного клинкера и т.д. [7, 8].

Исследования по сокращению выбросов углекислого газа в процессе производства портландцемента показывают, что на 1 т производимого цемента выделяется в среднем 0,9–1,1 т CO₂, в то время как потенциал связывания углекислого газа портландцементом составляет не более 5 % [9, 10]. Установлено, что на показатель связывания существенно влияет минералогический состав портландцементного клинкера, а белитовые цементы связывают большее количество углекислого газа, чем алитовые, приобретая в результате высокие физико-механические свойства. Эти исследования отразились на росте числа работ, ориентированных на снижение выбросов углекислого газа в цементной промышленности [11, 12]. Ряд разработанных дорожных карт и исследований рассматривают комплекс возможных направлений, в том числе использование дополнительных цементирующих материалов, таких как доменные металлургические шлаки, содержащие в своем составе 60–65 % минерала белит (C₂S), а также нефелиновые шламы (НФШ), цементные отходы и угольную золу вместо природных ресурсов. Металлургические шлаки обладают слабой гидравлической активностью или ее отсутствием, однако имеют высокую реакционную способность к принудительной карбонизации (связыванию углекислого газа), а продукты карбонизации (карбонаты кальция/магния, гидраты силиката кальция) служат основными фазами, проявляющими вяжущие свойства [13, 14]. В процессе принудительной карбонизации материалов, содержащих C₂S, изменяется пористость — она снижается за счет роста количества замкнутых пор, что зависит от условий протекания процесса. Количество микро- и мезопор увеличивается за счет образования кристаллов карбоната кальция и магния наноразмерного уровня, а количество макропор снижается [15–19]. В зависимости от времени карбонизации общая пористость может снижаться на 34–76 %. Таким образом, еще более перспективным вторичным сырьем для получения строительных материалов и изделий с низкой эмиссией CO₂ является нефелиновый шлам (попутный продукт производства глинозема щелочным способом из не-

фелиновых концентратов Кольского п-ова), содержащий в своем составе до 95 % белита.

Использование щелочных промышленных отходов для карбонизации минералов считается одним из перспективных направлений, поскольку их предполагаемый глобальный потенциал карбонизации может увеличиться до 3,3 Гт CO₂ в год к 2100 г., что может составить от 5 до 12 % от глобальных выбросов CO₂ к 2100 г. [20]. Кроме того, щелочные промышленные отходы могут быть карбонизированы на месте на том же заводе, где они производятся, минуя стадию транспортировки на полигоны хранения².

Цель исследования — разработка вяжущих веществ на основе твердых минеральных промышленных отходов, способных связывать углекислый газ в процессе своего твердения, приобретая при этом требуемые физико-механические свойства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сырьем для исследований стал НФШ Пикалевского глиноземного завода, являющийся крупнотоннажным попутным продуктом при производстве глинозема щелочным способом из нефелиновых концентратов Кольского полуострова. Нефелиновый шлам представляет собой мелкодисперсный продукт с долей свободной влаги 20–23 % мас. НФШ высушивали до постоянной массы при температуре 95 °С в лабораторном сушильном шкафу, чтобы исключить дальнейшее протекание возможных процессов гидратации основного минерала шлама. Необходимые качественные и количественные исследования НФШ осуществлялись после его высушивания. Химический анализ проводили с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) на энергодисперсионном спектрометре Epsilon 3XLE (PANalytical). Результаты анализа представлены в табл. 1.

Гранулометрический состав частиц НФШ определяли на лазерном дифракционном анализаторе Partica LA-960 (HORIBA) (рис. 1).

Результаты анализа показали, что гранулометрический состав НФШ составляют частицы размером от 2 до 2000 мкм. При этом анализ интегральной и дифференциальной кривых распределения частиц продемонстрировал, что НФШ представлен двумя

² IPCC. Special Report on CO₂ Capture and Storage // Intergovernmental Panel on Climate Change. 2005.

Табл. 1. Химический состав нефелинового шлама

Table 1. Chemical composition of nepheline sludge

Наименование Name	Содержание в пересчете на оксиды, % Content in terms of oxides, %							Всего, % Total, %
	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	
Нефелиновый шлам Nepheline sludge	63,41	0,72	27,73	3,24	2,51	1,41	0,91	99,93

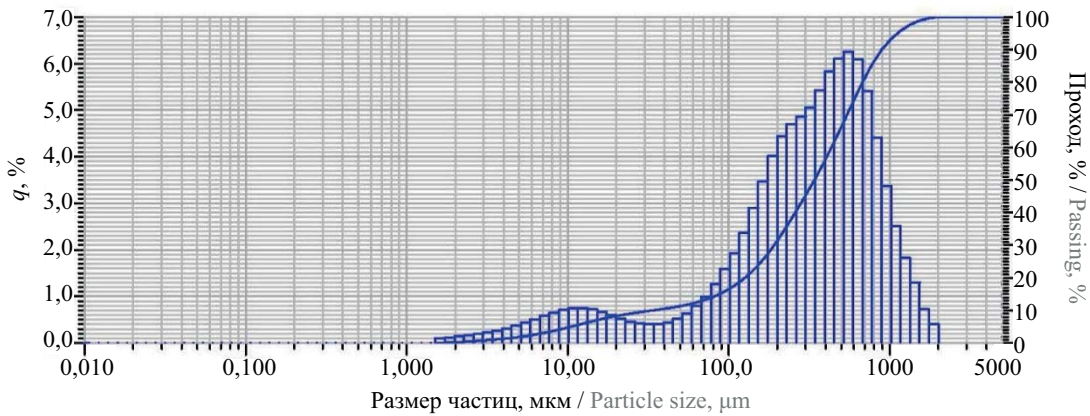


Рис. 1. Гранулометрический состав частиц НФШ
Fig. 1. Granulometric composition of NS particles

фракциями частиц: 2–50 и 50–2000 мкм с количественным соотношением 12 и 88 % соответственно. Общий средний геометрический размер частиц исследуемой пробы — 250 мкм.

Также кристаллические фазы НФШ анализировали по измерению дифракции рентгеновских лучей (XRD) на дифрактометре Europe 600 (GNR) с вертикальной θ – θ -геометрией Брегга – Брентано, укомплектованном керамической рентгеновской трубкой с медным анодом ($\lambda = 1,541874 \text{ \AA}$). Угловой диапазон съемки по 2θ составлял $5\text{--}80^\circ$, шаг сканирования — $0,02^\circ$, время измерения — 35 мин ($2,67 \text{ град/мин}$). Для выявления общего минерального состава среднюю пробу образца измельчали с помощью мельницы Retsch MM-400 до порошкового состояния. В программном комплексе (ПК) Match! и международной базе данных (ICDD PDF4 2020) выполняли идентификацию соединений путем сравнения полученного массива рефлексов с эталонными дифрактограммами индивидуальных соединений после установления фона, поиска и подгонки пиков. Количественное определение соединений проводилось по методу Ритвельда. Результаты рентгеноструктурного анализа представлены в табл. 2.

Из данных XRD-анализа следует, что исследуемый НФШ в основном представлен $\beta\text{-C}_2\text{S}$ (белит) в количестве 91,8 мас. % и незначительным количеством дополнительных минералов (см. табл. 2), главный из которых кальцит в количестве 4,5 мас. %.

Изучали влияние принудительной карбонизации на свойства НФШ на образцах-цилиндрах диаметром 30 мм и высотой $30 \pm 2 \text{ мм}$, для определения прочности на изгиб готовили образцы-пластины размером $50 \times 50 \text{ мм}$ и толщиной $8 \pm 1 \text{ мм}$. Образцы-цилиндры и пластины формовали в металлических пресс-формах на гидравлическом прессе с имитацией двухстороннего встречного прессования из подготовленной сырьевой смеси, состоящей из НФШ и заданного количества воды. При проведении исследований НФШ не подвергали помолу, а использовали для формования опытных образцов в исходном состоянии (гранулометрии) (см. рис. 1).

Для установления комплексного влияния технологических факторов изготовления образцов, а также режима их принудительной карбонизации использовали метод математического планирования эксперимента и, в частности, ротатабельный центральный композиционный план [21]. Экспериментально-статистические (ЭС) модели каждого исследованного параметра получали с помощью ПК StatSoft STATISTICA 12 в виде коэффициентов уравнения второго порядка:

$$Y = b_o + \sum_{i=1}^n b_i z_i + \sum_{i,j=1}^n b_{ij} z_i z_j + \sum b_{ii} z_i^2, \tag{1}$$

где b_o, b_i, b_{ij}, b_{ii} — коэффициенты корреляции, определяемые в результате математически-статистической обработки экспериментальных данных; z_i ,

Табл. 2. Кристаллические фазы нефелинового шлама
Table 2. Crystalline phases of nepheline sludge

Фаза Phase	Формула Formula	Массовая доля, % Mass fraction, %
Belite- β (Larnite)	Ca_2SiO_4	91,8
Belite- α'	Ca_2SiO_4	2,0
Calcite	CaCO_3	4,5
Monohydrocalcite	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1,4
Grossular	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	0,2
Chabazite	$\text{Ca}_{1,74}(\text{Al}_{3,48}\text{Si}_{8,52})\text{O}_{24} \cdot (\text{H}_2\text{O})_{18,15}$	0,1

Табл. 3. Исходные данные планирования эксперимента

Table 3. Initial experimental planning data

Наименование фактора Name of the factor	Код Code	Уровни варьирования Levels of variation					Интервал варьирования Variation interval
		–1,682	–1	0	1	1,682	
Давление прессования, МПа Pressing pressure, MPa	Z_1	13,18	20,0	30,0	40,0	46,82	10,0
Водосодержание смеси, % Water content of the mixture, %	Z_2	6,59	10,0	15,0	20,0	23,41	5,0
Время карбонизации, мин Carbonation time, min	Z_3	19,08	60,0	120,0	180,0	220,92	60,0

z_i — значение варьируемых рецептурно-технологических факторов.

На основе выводов, полученных при исследованиях принудительной карбонизации вяжущих систем на базе извести, были выбраны следующие технологические факторы: формовочное удельное давление прессования опытных образцов-цилиндров Z_1 , начальное водосодержание сырьевой смеси

Табл. 4. Матрица планирования эксперимента и физико-механические свойства опытных образцов после карбонизации (КТ) и последующих 28 сут твердения (СТ)

Table 4. The experimental planning matrix and the physico-mechanical properties of the prototypes, after carbonation (CH) and the subsequent 28 days of hardening (MH)

Переменные факторы в натуральном выражении Variable factors in kind			Оптимизируемые параметры Optimized parameters									
Z_1 , МПа MPa	Z_2 , %	Z_3 , мин min	$R_{сж}$, МПа R_c , MPa		$R_{изг}$, МПа R_{ρ} , MPa		ρ_o , кг/м ³ kg/m ³		W_m , %		K_p K_s	
			КТ CH	СТ MH	КТ CH	СТ MH	КТ CH	СТ MH	КТ CH	СТ MH	КТ CH	СТ DH
20,0	10,0	60,0	16,84	22,86	5,1	6,9	1712	1713	20,0	19,3	0,97	0,85
40,0	10,0	60,0	43,62	46,27	7,9	8,4	1835	1844	17,4	16,8	0,82	0,85
20,0	20,0	60,0	5,44	22,95	4,4	4,6	1640	1674	23,3	19,7	0,97	0,84
40,0	20,0	60,0	6,37	26,18	3,1	4,9	1747	1745	20,2	19,7	0,76	0,62
20,0	10,0	180,0	23,22	24,05	4,3	4,3	1828	1812	20,5	19,0	0,82	0,81
40,0	10,0	180,0	44,72	43,53	8,2	8,2	1997	1851	16,7	16,2	0,89	0,86
20,0	20,0	180,0	14,21	44,65	7,5	8,9	1670	1741	18,5	17,1	0,99	0,91
40,0	20,0	180,0	10,81	25,59	6,7	7,4	1765	1792	18,6	17,5	0,78	0,88
13,18	15,0	120,0	29,21	25,91	3,5	3,3	1640	1645	20,9	19,5	0,72	0,86
46,82	15,0	120,0	57,64	59,18	7,0	7,2	1870	1882	15,9	15,0	0,79	0,84
30,0	6,59	120,0	23,08	28,74	4,0	4,5	1760	1764	18,2	18,6	0,88	0,77
30,0	23,41	120,0	4,38	15,79	3,6	3,8	1706	1713	22,7	20,4	0,80	0,68
30,0	15,0	19,08	11,23	24,66	3,1	3,7	1709	1700	20,7	21,5	0,98	0,51
30,0	15,0	220,92	54,94	68,71	6,4	7,8	1886	1865	13,9	14,2	0,90	0,75
30,0	15,0	120,0	26,55	47,00	5,0	7,2	1810	1770	15,1	17,3	0,94	0,77
30,0	15,0	120,0	23,31	45,32	4,9	7,1	1791	1741	15,9	18,3	0,94	0,73
30,0	15,0	120,0	24,00	45,08	4,9	7,0	1795	1757	15,8	17,5	0,91	0,75
30,0	15,0	120,0	26,11	46,23	5,1	7,1	1807	1761	15,3	16,7	0,93	0,77
30,0	15,0	120,0	25,57	44,08	5,2	6,9	1802	1758	15,1	17,0	0,94	0,76
30,0	15,0	120,0	24,78	46,63	5,5	7,2	1797	1746	15,3	16,8	0,91	0,78

Z_2 , время принудительной карбонизации Z_3 [22, 23]. В табл. 3 представлены исходные данные планирования эксперимента.

В табл. 4 приведена матрица планирования эксперимента в кодированном и натуральном выражении. Величину анализируемого параметра оптимизации определяли как среднее арифметическое при испытании шести опытных образцов.

По истечении заданного времени принудительной карбонизации (см. табл. 3) из каждой точки плана часть образцов с остаточной влажностью помещалась в камеру нормального твердения ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $W = 95\%$) для испытания их после 28 сут. Для удобства эти образцы в дальнейшем обозначались как СТ (смешанное твердение, включающее начальную принудительную карбонизацию и последующую гидратацию). Вторую часть образцов аналогичного состава высушивали до постоянной массы при температуре $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ и испытывали для определения свойств сразу после карбонизации и обозначали как КТ (карбонатное твердение). Таким образом, исследовался процесс возможного дальнейшего гидратационного твердения материала после его начальной принудительной карбонизации. Дополнительно была изготовлена партия опытных образцов и сразу после изготовления помещена в камеру выдержки ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $W = 95\%$) для испытания их после 28 сут естественного твердения. Данная партия образцов не подвергалась начальной принудительной карбонизации и обозначалась как ГТ (гидратационное твердение). Эти образцы предназначались для получения сравнительных данных чистого гидратационного твердения и соответственно смешанного.

Принудительную карбонизацию опытных образцов-цилиндров выполняли в разработанной авторами карбонизационной установке [23]. Эксперимент проводили при концентрации CO_2 60 % и при атмосферном давлении. Камера карбонизации представляет собой металлическую емкость из нержавеющей стали с гидравлической рубашкой и герметично закрывающейся крышкой. Внутри камеры установлен вентилятор для осуществления во внутреннем пространстве перемешивания и равномерного распределения углекислого газа. Для выкачивания из внутреннего объема воздуха и создания в камере требуемой концентрации CO_2 подключен вакуум-насос. Источник углекислого газа — жидкая двуокись углерода высокого давления в баллонах.

Основные исследуемые физико-механические свойства опытных образцов-цилиндров — прочность при сжатии $R_{\text{сж}}$, прочность на изгиб $R_{\text{изг}}$, средняя плотность ρ_o , водопоглощение по массе W_m и водостойкость K_p . Прочность на сжатие и изгиб, среднюю плотность и водопоглощение по массе определяли по стандартным методикам для строительных материалов. Водостойкость устанавливали по коэффициенту размягчения K_p , который отражает способность материала сохранять свои эксплуатационные свойства при воздействии воды. Он рассчитывается

как отношение прочности при сжатии образца в насыщенном водой состоянии $R_{\text{вл}}$ к прочности при сжатии в сухом состоянии $R_{\text{сух}}$ по формуле:

$$K_p = \frac{R_{\text{вл}}}{R_{\text{сух}}}. \quad (2)$$

К водостойким относятся материалы, значение K_p которых более 0,8.

Фазовый состав образцов СТ и КТ, а соответственно и количество поглощенного CO_2 определяли с помощью термического и рентгенографического фазового анализов. В качестве структурной характеристики опытных образцов проводилось исследование их пористой структуры в зависимости от типа твердения (СТ или ГТ) с помощью метода эталонной контактной порометрии. Изменение пористости (распределение пор по размерам и их удельной поверхности) осуществлялось на Automated Standard Porosimeter 3.2 (MPM&P Research Inc).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 4 представлены матрица планирования эксперимента и результаты определения физико-механических свойств опытных образцов.

В табл. 5 приведены рассчитанные в результате статистической обработки опытных данных коэффициенты корреляции уравнений регрессии параметров оптимизации.

Анализ табл. 4, 5 свидетельствует об изменении основных исследуемых свойств карбонизированных образцов после их выдержки в течение 28 сут. Из оценки коэффициента b_o следует, что после 28 сут твердения существенно изменяется только прочность при сжатии $R_{\text{сж}}$ и водостойкость K_p , а изменение остальных свойств незначительно. При этом плотность ρ_o образцов снижается, а водопоглощение W_m возрастает.

Значимость влияния отдельных технологических факторов на формирование свойств карбонизированного НФШ различна. Если на прочность при сжатии $R_{\text{сж}}$ сразу после карбонизации определяющее значение оказывает начальное водосодержание смеси Z_2 (модель 1, $b_2 = -18,02$), то после 28 сут твердения определяющим фактором для этого параметра становится время карбонизации Z_3 (модель 2, $b_3 = 14,81$). Однако разница в абсолютных значениях между коэффициентами b_2 и b_3 ($-18,02$ и $17,47$ соответственно) сразу после карбонизации (модель 1) не столь велика, что указывает на существенное взаимное влияние факторов Z_2 и Z_3 на формирование свойств карбонизированных образцов. Аналогичная ситуация наблюдается и при анализе коэффициентов для других исследуемых свойств ($R_{\text{изг}}$, ρ_o , W_m , K_p) опытных образцов. Так, наиболее значимым фактором после карбонизации для прочности при изгибе и водостойкости $R_{\text{изг}}$ и K_p является давление прессования Z_1 , а для плотности и водопоглощения ρ_o и W_m более весомым выступает время карбонизации Z_3 .

Table 5. Correlation coefficients of regression equations for changes in the basic physical and mechanical properties of prototypes obtained after carbonation (CH) and the subsequent 28 days of hardening (MH)

Обозначение коэффициентов Designation of coefficients	Коэффициенты ЭС-моделей исследуемых параметров в зависимости от времени испытания Coefficients of the ES models of the studied parameters depending on the test time									
	$R_{сж}$, МПа R_c , MPa		$R_{изг}$, МПа R_f , MPa		ρ_o , кг/м ³ kg/m ³		W_m , %		K_p K_s	
	КТ CH	СТ MH	КТ CH	СТ MH	КТ CH	СТ MH	КТ CH	СТ MH	КТ CH	СТ MH
b_o	25,87	46,6	4,82	6,98	1799,1	1754,6	15,45	17,81	0,94	0,74
b_1	10,03	11,06	1,77	1,55	104,4	90,6	-2,19	-1,94	0,11	0,039
b_2	-18,02	-5,73	-0,65	-0,465	-93,8	-51,8	1,99	0,84	-0,02	-0,039
b_3	17,47	14,81	1,48	1,62	115,9	83,4	-3,05	-2,52	-0,09	0,029
b_{11}	8,54	-4,7	0,83	-0,515	-25,3	10,1	2,28	-0,42	-0,011	0,114
b_{22}	-12,45	-19,04	-0,197	-1,29	-40,9	-7,5	3,73	1,17	-0,054	0,026
b_{33}	1,23	-1,78	0,474	-0,16	4,76	23,6	1,50	0,01	0,016	-0,041
b_{12}	1,43	5,66	1,80	2,40	-57,5	2,0	-1,55	-0,98	0,03	0,090
b_{13}	-2,40	-6,56	0,40	0,15	8,5	-28,0	0,50	0,03	0,055	0,060
b_{23}	-12,69	-14,68	-2,20	-1,65	-22,5	-12,0	0,85	1,43	0,085	-0,075

ции. Условия изготовления образцов соответствовали условиям табл. 4. Результаты испытаний представлены в табл. 6.

Данные табл. 6 показывают, что исследуемый НФШ обладает слабой гидравлической активностью. Наблюдается незначительный рост прочности при сжатии и изгибе в 28-суточном возрасте. Средняя плотность к 28 сут твердения снижается, что также подтверждает протекание процессов гидратации белита ($\beta\text{-C}_2\text{S}$), сопровождающихся образованием капиллярно-пористой структуры материала, а соответственно и снижением его плотности. Для образцов гидравлического твердения прочность при сжатии в 28 сут твердения составила 13,0 МПа, тогда как аналогичный показатель предварительно карбонизированных образцов (см. табл. 4) варьировался в пределах 24,66–68,71 МПа (точки № 13–20) и зависел от времени карбонизации. Также уже после 19 мин принудительной карбонизации (см. табл. 4,

Table 6. Physico-mechanical properties of experimental specimens (HH) that are not subject to initial forced carbonation and hardened for 28 days

Условия изготовления Manufacturing conditions		Свойства образцов (ГТ) в зависимости от времени твердения, сут Properties of the specimens (HH) depending on the curing time, days																			
Z ₁ , МПа MPa	Z ₂ , %	3	7	14	28	3	7	14	28	3	7	14	28	3	7	14	28	3	7	14	28
		R _{сж} , МПа R _c , MPa				R _{изг} , МПа R _p , MPa				ρ _о , кг/м³ kg/m³				W _m , %				K _p K _s			
30,0	15,0	3,3	4,7	9,5	13,0	0,5	0,9	1,6	1,9	1739	1737	1707	1701	24,3	24,1	23,4	22,2	0,91	0,91	0,94	0,95

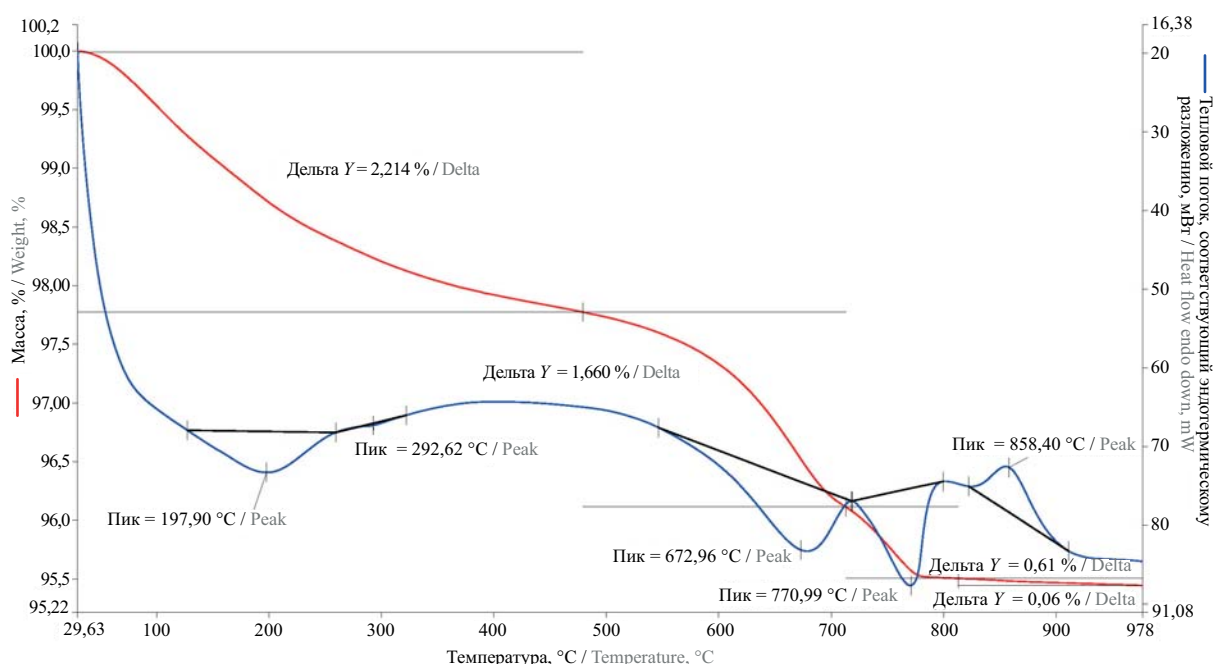
точка № 13) прочность при сжатии образцов составила 11,23 МПа. Это значение сопоставимо со значением 13,0 МПа для образцов, неподверженных карбонизации и твердевших 28 сут. Анализ табл. 4 и 6 показывает, что образцы смешанного твердения обладают гораздо более высокими показателями физико-механических и гидрофизических свойств в сравнении с аналогичными показателями после чистого гидратационного твердения (табл. 6).

Эффективность протекания реакции карбонизации, помимо изменения свойств материала после карбонизации, также связана с количественным поглощением углекислого газа на единицу массы этого материала. Данный показатель является определяющим в понимании перспективности применения того или иного материала, способного связывать CO_2 . С целью установления количества CO_2 в настоящем исследовании применяли методы термического и рентгенофазового анализов. Согласно плану проводимого эксперимента, наибольшим приростом массы образцов после карбонизации при различном сочетании технологических факторов изготовления образцов характеризовалась точка плана № 14 (см. табл. 4). Для этих образцов, исходного нефелинового шлама, а также для образцов, не подверженных карбонизации и твердевших только по гидратационному механизму (табл. 6), выполнен термический и рентгенографический фазовый анализы в возрасте 28 сут твердения. Данные термического анализа представлены на рис. 2.

Согласно сведениям термического анализа исходного НФШ (рис. 2, а) на DSC-кривой присутствуют три ярко выраженных эндотермических эффекта в диапазоне температур 130–800 °С, а также один экзотермический эффект в диапазоне температур

820–920 °С с экстремумом при 858 °С. Присутствует также незначительный по площади и изменению теплового потока эндоэффект с экстремумом при 293 °С. Особенности переработки нефелиновых концентратов способом спекания с последующим извлечением глинозема позволяют теоретически получать попутный продукт (НФШ), представленный в основном минералом белит. Известны четыре кристаллические модификации белита (α , α' , γ и β). Из них только модификация $\beta\text{-C}_2\text{S}$ обладает слабой гидравлической активностью, а ее кристаллизация в процессе образования НФШ наиболее вероятна [24]. Таким образом, в составе исследуемого нефелинового шлама может содержаться как безводный $\beta\text{-C}_2\text{S}$, так и продукты его гидратации. Эндоэффекты в интервале до 350 °С с максимумами при 198 и 293 °С на DSC-кривой соответствуют частично удалению адсорбционной воды из гелеобразных продуктов гидратации $\beta\text{-C}_2\text{S}$. Эндоэффект с максимумом при 673 °С предположительно соответствует полной дегидратации высокоосновных гидросиликатов кальция типа C_2SH_2 . Экзотермический эффект при 771 °С с потерей массы 0,61 мас. % соответствует диссоциации карбоната кальция, находящегося в шламе в количестве до 2,0 мас. %. Экзотермический эффект в диапазоне температур 820–920 °С с экстремумом при 858 °С, вероятно, характеризует фазовый переход дегидратированных силикатов кальция в воластонит. Суммарная потеря массы НФШ составила 4,54 мас. %.

TG- и DSC-кривые термограммы образцов ГТ (рис. 2, б) в основном повторяют конфигурацию аналогичных кривых исходного НФШ (рис. 2, а). Отличие — повышенная потеря массы на TG-кривой в соответствующих температурных интервалах и уве-



а

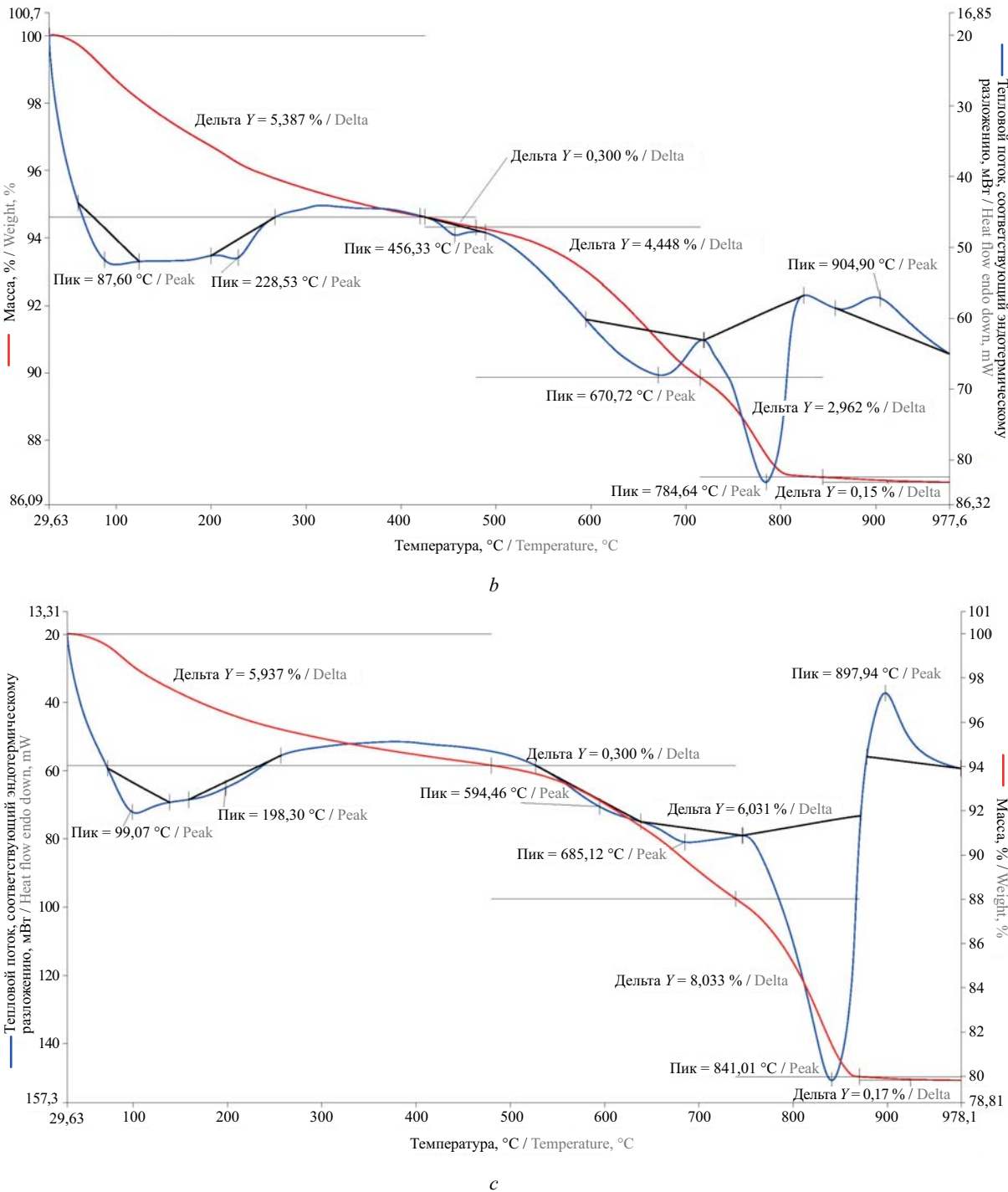


Рис. 2. Результаты TG- и DSC-анализа исходного нефелинового шлама (a); образцов ГТ (b); образцов СТ (c)
Fig. 2. Results of TG-DSC analysis of the initial nepheline sludge (a); NH specimens (b); MH specimens (c)

личение площади термических эффектов с сохранением температурных максимумов, что подтверждает протекание процесса гидратации белита (β - C_2S) и образование более значительного количества гелеобразных продуктов гидратации. Также фактором, подтверждающим протекание гидратационных процессов с появлением дополнительных продуктов реакции, является появление эндоэффекта в интервале 420–479 °C с максимумом при 456 °C. Этот эффект соответствует дегидратации $Ca(OH)_2$. Количество

$Ca(OH)_2$, рассчитанное по величине потери массы, составило 1,23 %. Необходимо отметить, что изменение массы пробы в диапазоне 820–977 °C, связанное с фазовым переходом дегидратированных силикатов кальция в волластонит, составило 0,15 %, что в 2,5 раза больше аналогичного показателя (0,06 %) для НФШ (рис. 2, a).

DSC-кривая карбонизированных и далее твердевших 28 сут образцов (рис. 2, c) имеет два отличительных признака в сравнении с аналогичной кривой

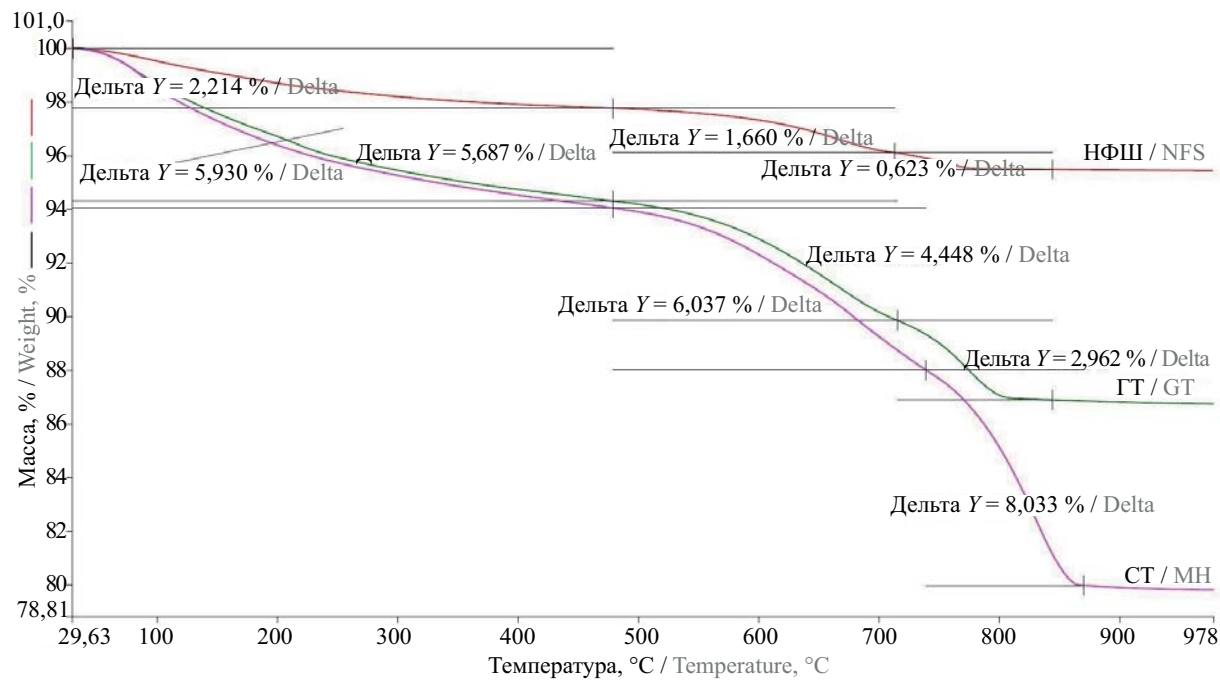


Рис. 3. Результаты TG-анализа образцов: НФШ, ГТ и СТ

Fig. 3. Results of TG analysis of specimens: NS, NH and MH

(рис. 2, *b*). Так, эндоэффект, характеризующий наличие карбоната кальция, имеет более значительную площадь поверхности и существенно смещенный в более высокую температурную область максимум, а именно 841 °С в отличие от 784,6 °С для не карбонизированных образцов. Разница в потере масс, характеризующая количество выделившегося CO₂, также ощутима и составляет соответственно 8,0 и 2,9 %.

Табл. 7. Изменение массы исследуемых образцов в соответствующих температурных диапазонах в зависимости от условий твердения нефелинового шлама

Table 7. Change in the mass of the studied specimens in the corresponding temperature ranges depending on the hardening conditions of nepheline sludge

Наименование Name	Температурный диапазон, °C Temperature range, °C					Общая потеря массы, % Total weight loss, %	
	30–479	479–715	479–740	715–820	740–880	H ₂ O	CO ₂
	Потеря массы, % Weight loss, %						
НФШ / NS	2,21	1,66	–	0,62	–	3,87	0,62
ГТ / NH	5,39/0,3*	4,45	–	2,96	–	9,84	2,96
СТ / MH	5,93	–	6,04	–	8,03	11,97	8,03
Физико-химические изменения Physicochemical changes	Частичное удаление адсорбционной воды из гелеобразных продуктов гидратации β-C ₂ S Partial removal of adsorption water from gel-like hydration products of β-C ₂ S	Полная дегидратации высокоосновных гидросиликатов кальция Complete dehydration of highly basic calcium hydrosilicates		Диссоциация CaCO ₃ Dissociation of CaCO ₃			

Примечание: 5,39/0,3* — 0,3 % соответствует дегидратации Ca(OH)₂ (см. рис. 2, *b*) и в расчете степени гидратации не учитывается.

Note: 5.39/0.3* — 0.3 % corresponds to the dehydration of Ca(OH)₂ (see Fig. 2, *b*) and is not taken into account in the calculation of the degree of hydration.

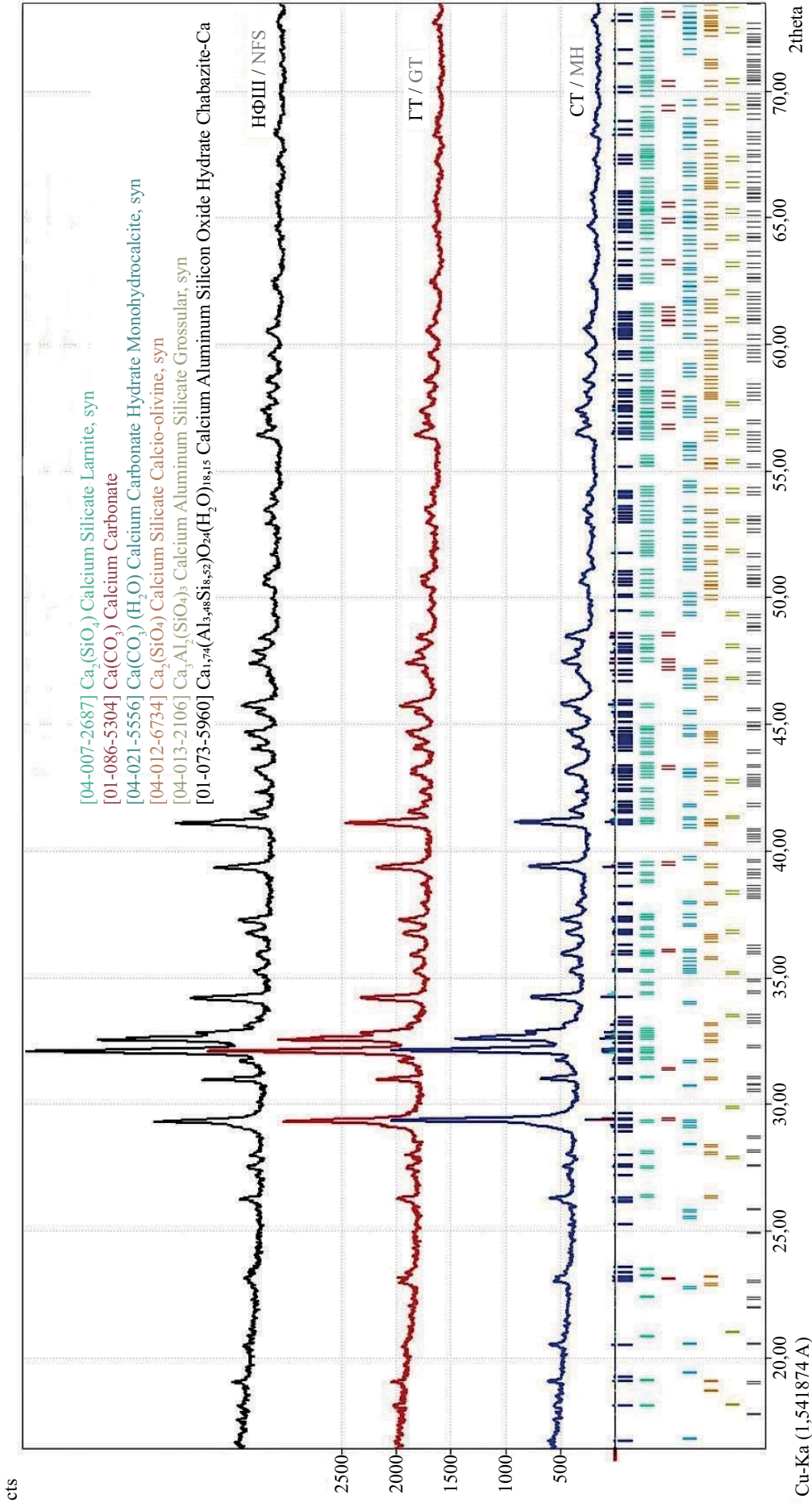


Рис. 4. Результаты XRD-анализа образцов: НФШ, ГТ и СТ

Fig. 4. XRD specimen analysis results: NS, HH and MH

Табл. 8. Кристаллические фазы образцов гидратационного и смешанного твердения
Table 8. Crystalline phases of specimens of hydration and mixed hardening

Фаза Phase	Формула Formula	ГТ / НН	СТ / МН
		Массовая доля, % Mass fraction, %	
Belite-β (Larnite)	Ca ₂ SiO ₄	88,6	71,3
Belite-α'	Ca ₂ SiO ₄	1,3	1,9
Calcite	CaCO ₃	7,4	20,8
Monohydrocalcite	CaCO ₃ · H ₂ O	1,4	5,2
Grossular	Ca ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	0,6	0,6
Chabazite	Ca _{1,74} (Al _{3,48} Si _{8,52})O ₂₄ · (H ₂ O) _{18,15}	0,3	0,2

Более подробный анализ изменения массы исследуемых образцов в соответствующих температурных диапазонах представлен на рис. 3 и в табл. 7.

Оценка количественных показателей изменения массы исследуемых образцов (см. рис. 3, табл. 7) показывает, что предварительная карбонизация шлама способствует большей степени гидратации белита (β-C₂S) в возрасте 28 сут в сравнении с аналогичным образцом, не подвергнутым начальной карбонизации. Степень гидратации образцов-цилиндров, твердевших по гидратационному типу — 9,84 %, твердевших по смешанному типу — 11,97 %. Степень связываемого углекислого газа также была выше и составила 2,96 и 8,03 % соответственно. Расчетные значения содержания карбоната кальция — 6,7 и 18,3 %. Из приведенных экспериментальных данных следует, что одна тонна нефелинового шлама (в исходной granulometрии) может связать 80,3 кг углекислого газа. Следует отметить, что для образцов, твердевших по смешанному режиму, наблюдается смещение температурного диапазона в сторону больших температур как для процессов полной дегидратации высокоосновных гидросиликатов кальция, так и для диссоциации CaCO₃, что говорит о большем содержании этих соединений в пробе и их повышенной степени кристалличности.

Данные термического анализа согласуются с данными рентгенографического фазового анализа, результаты которого представлены на рис. 4 и в табл. 8.

Из табл. 8 о фазовом составе образцов гидратационного твердения следует, что НФШ обладает слабой гидравлической активностью, что выражается незначительным уменьшением количества β-C₂S через 28 сут твердения (88,6 %) в сравнении с аналогичным показателем для НФШ (91,8 % (см. табл. 2)), а также низкими показателями прочности при сжатии и изгибе (см. табл. 6). Количество β-C₂S для образцов, подверженных начальной принудительной карбонизации и твердевших далее 28 сут (СТ), снижается до значения 71,3 %. Это говорит о вступлении данного минерала в химическую реакцию с CO₂ с осаждением в качестве продукта реакции — карбоната кальция, обладающего вяжущими свойствами и способствующего существенному повышению физико-механических свойств карбонизированного материала. При этом не вступивший в начальную реакцию принудительной карбонизации β-C₂S при дальнейшей выдержке образцов продолжает более интенсивно гидратироваться, что приводит к росту прочностных показателей. На представленных на рис. 4 рентгенограммах наблюдается уменьшение интенсивности основных линий β-C₂S и увеличение аналогичных линий для карбоната кальция. Более интенсивный рост отмечается для образцов смешанного твердения. В общем количество CaCO₃ для образцов ГТ и СТ составило 7,4 и 20,8 % соответственно.

Анализ пористости образцов гидратационного и смешанного твердения проводили методом эталонной контактной порометрии. Результаты исследования пористости структуры представлены на рис. 5 и в табл. 9.

Из полученных порограмм следует, что характер структуры материала формируется на стадии прессования образцов-цилиндров и существенно зависит от фракционного состава исходного сырья. Начальная карбонизация, в свою очередь, приводит к снижению общей пористости. Так, общая пористость образцов СТ снижается на 7,5 % после 28 сут твердения в сравнении с образцами ГТ. При этом из анализа кривых видно, что существенные различия пористо-

Табл. 9. Поры в образцах, распределенные в зависимости от их радиусов и способа твердения, %
Table 9. Pores in specimens distributed depending on their radii and hardening method, %

Наименование Name	Радиус пор, мкм Pore radius, μm							Всего Total
	0–0,1	0,1–1,0	1,0–6,0	6,0–7,0	7,0–8,0	8,0–9,0	9,0–15,0	
	Объем пор, % Pore volume, %							
ГТ / НН	13,5	7,0	7,0	2,0	2,0	3,0	3,0	37,5
СТ / МН	12,7	3,3	4,0	4,5	3,0	1,0	1,5	30,0

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 21. Выпуск 4, 2026
Vestnik MGUSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 21. Issue 4, 2026

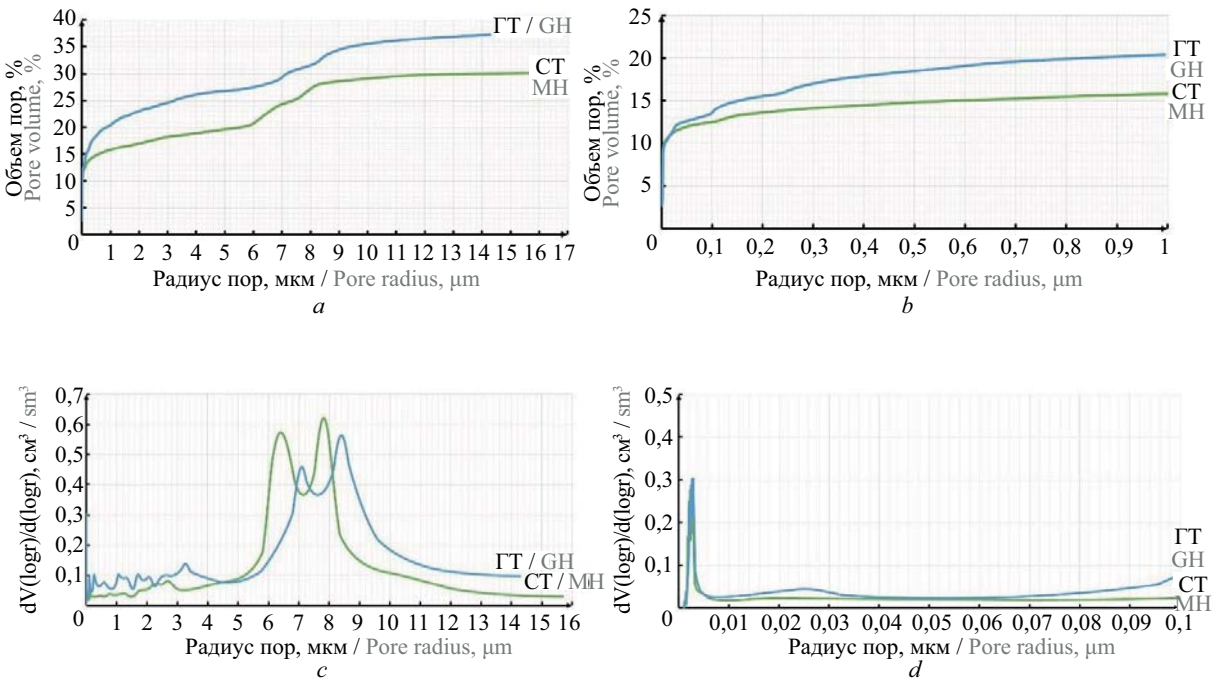


Рис. 5. Графики распределения пор исследуемых образцов (ГТ и СТ): *a, b* — интегральные; *c, d* — дифференциальные
Fig. 5. Graphs of the pore distribution of the studied specimens (HN and MH): *a, b* — integral; *c, d* — differential

сти исследуемых образцов начинаются при эффективном радиусе пор более 0,1 мкм. При радиусе пор менее 0,1 мкм кривые практически накладываются друг на друга, а значит реакция карбонизации в этих порах не проходила. Количество пор данного радиуса для двух образцов практически одинаково и составило 12,7–13,5 %. Анализ дифференциальных кривых (см. рис. 5 *c, d*) показывает, что у образцов СТ радиусы пор в диапазоне 6–9 мкм смещаются в сторону меньших значений в сравнении с образцами ГТ. Это объясняется нарастанием на стенках пор продуктов карбонизации и последующей гидратации, вследствие чего уменьшается радиус пор, а также происходит деление крупных пор на более мелкие.

Суммарный объем пор в диапазоне радиусов 0,1–15 мкм составил для образцов СТ и ГТ 14,3 и 24,0 % соответственно. Эти значения достаточно точно согласуются с опытными данными водопоглощения по массе в 28 сут для данных образцов (14,2 и 22,2 %). Возможно, пористость с радиусом пор менее 0,1 мкм является закрытой и доступ воды к этим порам ограничен. Следовательно, образцы, твердевшие по смешанному типу, более предпочтительны и ввиду лучших физико-механических свойств, и с точки зрения количественного связывания CO₂.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обзор литературных источников способов утилизации отходов производств показал, что твердые отходы накапливаются в отвалах промышленных предприятий (например, нефелиновый шлам) и выбрасываются в атмосферу (углекислый газ). Экспе-

риментальные данные, полученные в ходе исследований, позволяют сделать вывод о том, что эти виды сырья обладают большим потенциалом для производства строительных материалов и изделий. В результате оптимизации технологических параметров получения карбонизированного материала на основе НФШ были произведены карбонизированные образцы с прочностью при сжатии в пределах 4–69 МПа, на изгиб 3–9,0 МПа. Водопоглощение по массе составило 14,2–21,5 %, а средняя плотность 1645–1882 кг/м³. Коэффициент размягчения материала варьировался в пределах 0,51–0,99.

Детальный анализ экспериментальных данных дал возможность установить, что начальная принудительная карбонизации опытных образцов способствует появлению в структуре материала CaCO₃, обладающего вяжущими свойствами, а также интенсифицирует процесс последующей гидратации не вступившего в реакцию карбонизации β-C₂S с образованием дополнительных гелеобразных продуктов гидратации, способствующих улучшению эксплуатационных свойств конечного материала. Также повышается степень гидратации материала в сравнении с образцами только гидратационного типа твердения. Определено, что, используя НФШ в своем естественном гранулометрическом состоянии, при заданных технологических факторах количество связанного CO₂ на одну тонну исходного шлама составило 80,3 кг. Теоретически этот показатель возможно увеличить при введении в данные исследования дополнительных технологических факторов и способов подготовки исходного нефелинового шлама (например, дополнительный помол НФШ).

Обобщенный анализ полученных результатов позволяет предположить, что из указанного вида сырья предлагаемым методом начальной принудительной карбонизации возможно изготовление определенной номенклатуры строительных изделий карбонатного

типа твердения, которые будут удовлетворять требованиям соответствующих нормативных документов, а использование вторичного сырья (нефелиновый шлак, выбросы CO₂) будет снижать себестоимость готовых карбонизированных строительных изделий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Schneider T., Kaul C.M., Pressel K.G.* Possible climate transitions from breakup of stratocumulus decks under greenhouse warming // *Nature Geoscience*. 2019. Vol. 12. Issue 3. Pp. 163–167. DOI: 10.1038/s41561-019-0310-1. EDN TMSLDZ.
2. *Moumin G., Ryssel M., Zhao L., Markewitz P., Sattler C., Robinius M. et al.* CO₂ emission reduction in the cement industry by using a solar calciner // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 145. Pp. 1578–1596. DOI: 10.1016/j.renene.2019.07.045. EDN CHILYY.
3. *Lippiatt N., Ling T., Pan S.* Towards carbon-neutral construction materials: Carbonation of cement-based materials and the future perspective // *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 28. P. 101062. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101062. EDN UQYBLS.
4. *Huang L., Krigsvoll G., Johansen F., Liu Y., Zhang X.* Carbon emission of global construction sector // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81. Pp. 1906–1916. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.001
5. *Proaño L., Sarmiento A.T., Figueredo M., Cobo M.* Techno-economic evaluation of indirect carbonation for CO₂ emissions capture in cement industry: A system dynamics approach // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 263. P. 121457. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121457. EDN SNJISJ.
6. *Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M.* Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 114. Pp. 2–26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
7. *Bhagath Singh G.V.P., Subramaniam K.V.L.* Production and characterization of low-energy Portland composite cement from post-industrial waste // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 239. P. 118024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118024
8. *Imbabi M.S., Carrigan C., McKenna S.* Trends and developments in green cement and concrete technology // *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2012. Vol. 1. Issue 2. Pp. 194–216. DOI: 10.1016/j.ijbsbe.2013.05.001
9. *Maddalena R., Roberts J.J., Hamilton A.* Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 186. Pp. 933–942. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.138
10. *Turner L.K., Collins F.G.* Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: a comparison between geopolymer and OPC cement concrete // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 43. Pp. 125–130. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023
11. *Li C., Li Y., Zhu W., Zeng G., Ouyang Z., Cheng M. et al.* Carbon dioxide cured building materials as an approach to decarbonizing the calcium carbide related industry // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 186. P. 113688. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113688. EDN ETCTRZ.
12. *Izumi Y., Iizuka A., Ho H.-Ju.* Calculation of greenhouse gas emissions for a carbon recycling system using mineral carbon capture and utilization technology in the cement industry // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 312. P. 127618. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127618. EDN FEWJUD.
13. *Boone M.A., Nielsen P., Kock T.D., Boone M.N., Quaghebeur M., Cnudde V.* Monitoring of stainless-steel slag carbonation using X-ray computed microtomography // *Environmental Science & Technology*. 2014. Vol. 48. Issue 1. Pp. 674–680. DOI: 10.1021/es402767q
14. *Ghouleh Z., Guthrie R.I.L., Shao Y.* High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 99. Pp. 175–183. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028
15. *Humbert P.S., Castro-Gomes J.P., Savastano H.* Clinker-free CO₂ cured steel slag based binder: Optimal conditions and potential applications // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 210. Pp. 413–421. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.169
16. *Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M.* Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 114. Pp. 2–26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
17. *Humbert P.S., Castro-Gomes J.* CO₂ activated steel slag-based materials : a review // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 208. Pp. 448–457. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.058
18. *Ghouleh Z., Guthrie R.I.L., Shao Y.* Production of carbonate aggregates using steel slag and carbon dioxide for carbon-negative concrete // *Journal of CO₂ Utilization*. 2017. Vol. 18. Pp. 125–138. DOI: 10.1016/j.jcou.2017.01.009
19. *Lee S., Kim J.W., Chae S., Bang J.H., Lee S.W.* CO₂ sequestration technology through mineral carbonation: An extraction and carbonation of blast slag //

Journal of CO₂ Utilization. 2016. Vol. 16. Pp. 336–345. DOI: 10.1016/j.jcou.2016.09.003

20. Renforth P. The negative emission potential of alkaline materials // Nature Communications. 2019. Vol. 10. Issue 1. DOI: 10.1038/s41467-019-09475-5. EDN JAWOKQ.

21. Сидняев Н.И., Вилисова Н.Т. Введение в теорию планирования эксперимента : учебное пособие. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 463 с. EDN QNDDDL.

22. Lyubomirskiy N., Bakhtin A., Fic S., Szafraniec M., Bakhtina T. Intensive ways of producing carbonate curing building materials based on lime secondary raw

materials // Materials. 2020. Vol. 13. Issue 10. P. 2304. DOI: 10.3390/ma13102304

23. Lyubomirskiy N.V., Bakhtina T.A., Bakhtin A.S., Fedorkin S.I. The carbonate-hardening lime construction material properties formation during their long-term storage and use under normal conditions // Materials Science Forum. 2019. Vol. 974. Pp. 187–194. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.187. EDN YFFRYK.

24. Сизяков В.М., Бричкин В.Н., Куртенков Р.В. Повышение комплексности переработки нефелинового сырья на основе содовой конверсии белитового шлама // Обогащение руд. 2016. № 1. С. 54–59. DOI: 10.17580/or.2016.01.09. EDN VLFZDT.

Поступила в редакцию 10 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 2 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 10 января 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Сергеевич Бахтин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; Институт «Академия строительства и архитектуры» (структурное подразделение) Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского (АСиА КФУ им. В.И. Вернадского); 295000, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 846523, Scopus: 57191596769, ResearcherID: N-9489-2016, ORCID: 0000-0001-6255-8948; aleserba@mail.ru;

Николай Владимирович Любомирский — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; Институт «Академия строительства и архитектуры» (структурное подразделение) Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского (АСиА КФУ им. В.И. Вернадского); 295000, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 779436, Scopus: 57202812296, ResearcherID: Y-4548-2019, ORCID: 0000-0001-6298-5077; niklub.ua@gmail.com;

Тамара Алексеевна Бахтина — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; Институт «Академия строительства и архитектуры» (структурное подразделение) Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского (АСиА КФУ им. В.И. Вернадского); 295000, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 840822, Scopus: 57202813160, ResearcherID: N-8860-2016, ORCID: 0000-0002-5241-0074; t.bakhtina83@gmail.com;

Герман Русланович Биленко — аспирант кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; Институт «Академия строительства и архитектуры» (структурное подразделение) Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского (АСиА КФУ им. В.И. Вернадского); 295000, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 1099392; ger-bilenko@yandex.ru;

Иван Анатольевич Тюнюков — аспирант кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; Институт «Академия строительства и архитектуры» (структурное подразделение) Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского (АСиА КФУ им. В.И. Вернадского); 295000, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; utyunyukov@mail.ru.

Вклад авторов:

Бахтин А.С. — научное руководство, написание исходного текста, итоговые выводы.

Любомирский Н.В. — научное руководство, концепция исследования.

Бахтина Т.А. — написание и редактирование исходного текста, итоговые выводы.

Биленко Г.Р. — проведение лабораторных испытаний, обработка результатов, оформление текста.

Тюнюков И.А. — проведение лабораторных испытаний, обработка результатов, оформление текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Schneider T., Kaul C.M., Pressel K.G. Possible climate transitions from breakup of stratocumulus decks under greenhouse warming. *Nature Geoscience*. 2019; 12(3):163-167. DOI: 10.1038/s41561-019-0310-1. EDN TMSLDZ.

2. Moumin G., Ryssel M., Zhao L., Markewitz P., Sattler C., Robinius M. et al. CO₂ emission reduction in the cement industry by using a solar calciner. *Renewable Energy*. 2020; 145:1578-1596. DOI: 10.1016/j.renene.2019.07.045. EDN CHILYY.

3. Lippiatt N., Ling T., Pan S. Towards carbon-neutral construction materials: Carbonation of cement-based materials and the future perspective. *Journal of Building Engineering*. 2020; 28:101062. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101062. EDN UQYBLS.
4. Huang L., Krigsvoll G., Johansen F., Liu Y., Zhang X. Carbon emission of global construction sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018; 81:1906-1916. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.001
5. Proaño L., Sarmiento A.T., Figueredo M., Cobo M. Techno-economic evaluation of indirect carbonation for CO₂ emissions capture in cement industry: A system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 263:121457. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121457. EDN SNJISJ.
6. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*. 2018; 114:2-26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
7. Bhagath Singh G.V.P., Subramaniam K.V.L. Production and characterization of low-energy Portland composite cement from post-industrial waste. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 239:118024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118024
8. Imbabi M.S., Carrigan C., McKenna S. Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2012; 1(2):194-216. DOI: 10.1016/j.ijbsbe.2013.05.001
9. Maddalena R., Roberts J.J., Hamilton A. Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 186:933-942. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.138
10. Turner L.K., Collins F.G. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: a comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*. 2013; 43:125-130. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023
11. Li C., Li Y., Zhu W., Zeng G., Ouyang Z., Cheng M. et al. Carbon dioxide cured building materials as an approach to decarbonizing the calcium carbide related industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023; 186:113688. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113688. EDN ETCTRZ.
12. Izumi Y., Iizuka A., Ho H.-Ju. Calculation of greenhouse gas emissions for a carbon recycling system using mineral carbon capture and utilization technology in the cement industry. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 312:127618. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127618. EDN FEWJUD.
13. Boone M.A., Nielsen P., Kock T.D., Boone M.N., Quaghebeur M., Cnudde V. Monitoring of stainless-steel slag carbonation using X-ray computed microtomography. *Environmental Science & Technology*. 2014; 48(1):674-680. DOI: 10.1021/es402767q
14. Ghouleh Z., Guthrie R.I.L., Shao Y. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation. *Construction and Building Materials*. 2015; 99:175-183. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028
15. Humbert P.S., Castro-Gomes J.P., Savastano H. Clinker-free CO₂ cured steel slag based binder: Optimal conditions and potential applications. *Construction and Building Materials*. 2019; 210:413-421. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.169
16. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*. 2018; 114:2-26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
17. Humbert P.S., Castro-Gomes J. CO₂ activated steel slag-based materials : a review. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 208:448-457. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.058
18. Ghouleh Z., Guthrie R.I.L., Shao Y. Production of carbonate aggregates using steel slag and carbon dioxide for carbon-negative concrete. *Journal of CO₂ Utilization*. 2017; 18:125-138. DOI: 10.1016/j.jcou.2017.01.009
19. Lee S., Kim J.W., Chae S., Bang J.H., Lee S.W. CO₂ sequestration technology through mineral carbonation: An extraction and carbonation of blast slag. *Journal of CO₂ Utilization*. 2016; 16:336-345. DOI: 10.1016/j.jcou.2016.09.003
20. Renforth P. The negative emission potential of alkaline materials. *Nature Communications*. 2019; 10(1). DOI: 10.1038/s41467-019-09475-5. EDN JAWOKQ.
21. Sidnyaev N.I., Vilisova N.T. *Introduction to the theory of experiment planning: textbook*. Moscow, Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, 2011; 463. EDN QNDDDL. (rus.).
22. Lyubomirskiy N., Bakhtin A., Fic S., Szafraniec M., Bakhtina T. Intensive ways of producing carbonate curing building materials based on lime secondary raw materials. *Materials*. 2020; 13(10):2304. DOI: 10.3390/ma13102304
23. Lyubomirskiy N.V., Bakhtina T.A., Bakhtin A.S., Fedorkin S.I. The carbonate-hardening lime construction material properties formation during their long-term storage and use under normal conditions. *Materials Science Forum*. 2019; 974:187-194. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.187. EDN YFFRYK.
24. Sizyakov V.M., Brichkin V.N., Kurtenkov R.V. Increasing all-round utilization of nepheline raw materials through belite sludge soda conversion. *Obogashchenie Rud*. 2016; 1:54-59. DOI: 10.17580/or.2016.01.09. EDN VLFZDT. (rus.).

Received October 10, 2025.

Adopted in revised form on December 2, 2025.

Approved for publication on January 10, 2026.

B I O N O T E S: **Aleksandr S. Bakhtin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Institute “Academy of Construction and Architecture” (a structural division) of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 181 Kiyevskaya st., Simferopol, 295000, Russian Federation; ID RSCI: 846523, Scopus: 57191596769, ResearcherID: N-9489-2016, ORCID: 0000-0001-6255-8948; aleserba@mail.ru;

Nikolay V. Lyubomirskiy — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Institute “Academy of Construction and Architecture” (a structural division) of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 181 Kiyevskaya st., Simferopol, 295000, Russian Federation; ID RSCI: 779436, Scopus: 57202812296, ResearcherID: Y-4548-2019, ORCID: 0000-0001-6298-5077; niklub.ua@gmail.com;

Tamara A. Bakhtina — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Institute “Academy of Construction and Architecture” (a structural division) of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 181 Kiyevskaya st., Simferopol, 295000, Russian Federation; ID RSCI: 840822, Scopus: 57202813160, ResearcherID: N-8860-2016, ORCID: 0000-0002-5241-0074; t.bakhtina83@gmail.com;

German R. Bilenko — postgraduate student of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Institute “Academy of Construction and Architecture” (a structural division) of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 181 Kiyevskaya st., Simferopol, 295000, Russian Federation; ID RSCI: 1099392; ger-bilenko@yandex.ru;

Ivan A. Tyunyukov — postgraduate student of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Institute “Academy of Construction and Architecture” (a structural division) of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 181 Kiyevskaya st., Simferopol, 295000, Russian Federation; utyunyukov@mail.ru.

Contribution of the authors:

Aleksandr S. Bakhtin — scientific supervision, writing the original text, final conclusions.

Nikolay V. Lyubomirskiy — scientific leadership, research concept.

Tamara A. Bakhtina — writing and editing of the original text, final conclusions.

German R. Bilenko — conducting laboratory tests, processing results, formatting text.

Ivan A. Tyunyukov — conducting laboratory tests, processing results, formatting text.

The authors declare that they have no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.32:544.3.01:697.7:620.97

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.577-591

Стабилизация термоаккумулирующего материала углеродным носителем в составе высокопрочного легкого бетона

Софья Руслановна Сокольниковна, Александр Сергеевич Иноземцев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель исследования — разработка инновационного строительного материала с пассивной терморегуляцией на основе высокопрочного легкого бетона на полых микросферах с применением термоаккумулирующих материалов (ТАМ), стабилизированных в углеродном носителе (активированных углях). Исследователями решена задача обеспечения функционирования ТАМ в среде с низкой теплопроводностью (в высокопрочном легком бетоне D1400) при сохранении прочностных свойств.

Материалы и методы. Применялся высокопрочный легкий бетон плотностью 1400 кг/м³ на полых алюмосиликатных микросферах. В качестве ТАМ использовались кокосовое масло и полиэтиленгликоль (ПЭГ) 600. Стабилизация ТАМ проводилась в углеродных носителях — активированных углях трех марок УГ1, УГ2 и УГ3.

Результаты. Сорбционная способность исследуемых активированных углей составила 80 % для ПЭГ и 50 % для кокосового масла. Плотность образцов снизилась до 1320–1390 кг/м³ при концентрациях до 2,5 %, при этом теплопроводность образцов с УГ2 и УГ3 увеличилась до 0,58–0,60 Вт/(м·К). Также использование УГ2 + ПЭГ, УГ2 + масло и УГ3 + ПЭГ позволяет сохранить физико-механические характеристики бетона — прочность при изгибе и сжатии — более 4,3 и 41,8 МПа соответственно.

Выводы. Применение УГ2 для стабилизации кокосового масла и ПЭГ, а также УГ3 для стабилизации ПЭГ в концентрациях до 2,5 % обеспечивает эффективную работу ТАМ в среде с низкой теплопроводностью (легком бетоне), позволяет сорбировать до 80 % ПЭГ и до 50 % кокосового масла, что значительно превышает сорбирующие способности широко распространенных носителей для ТАМ. Также одним из основных преимуществ выбранных носителей является сохранение высоких значений прочности легкого бетона при изгибе и сжатии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: материал с функцией фазового перехода, энергосбережение, пассивная терморегуляция, высокопрочный легкий бетон, полые алюмосиликатные микросферы, полиэтиленгликоль 600, кокосовое масло, активированный уголь

Благодарности. Работа финансировалась Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2026-0003.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сокольникова С.Р., Иноземцев А.С. Стабилизация термоаккумулирующего материала углеродным носителем в составе высокопрочного легкого бетона // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 4. С. 577–591. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.577-591

Автор, ответственный за переписку: Софья Руслановна Сокольниковна, srsokolnikova@mail.ru.

Stabilization of heat-storage material using a carbon carrier in high-strength lightweight concrete

Sofia R. Sokolnikova, Aleksandr S. Inozemtcev

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

ABSTRACT

Introduction. The purpose of this study is to develop an innovative building material with passive thermal regulation based on high-strength lightweight concrete on cenospheres using heat storage materials (HSM) stabilized in a carbon carrier (activated carbons). The researchers solved the problem of ensuring the functioning of the HSM in an environment with low thermal conductivity (in high-strength lightweight concrete with an average density of 1,400 kg/m³) while maintaining strength properties.

Materials and methods. The work used high-strength lightweight concrete on cenospheres with a density of 1,400 kg/m³. Coconut oil and polyethylene glycol (PEG) 600 were used as HSM. The HSM were stabilized in carbon carriers (activated carbons) of three grades: AC1, AC2 and AC3.

Results. The sorption capacity of the studied activated carbons was 80 % for PEG and 50 % for coconut oil. The average density of the specimens decreased to 1,320–1,390 kg/m³ at concentrations up to 2.5 %, while the thermal conductivity

of the specimens with AC2 and AC3 increased to 0.58–0.60 W/(m·K). Also, the use of AC2 + PEG, AC2 + oil and AC3 + PEG allows to preserve the physical and mechanical characteristics of concrete: flexural and compressive strength more than 4.3 and 41.8 MPa, respectively.

Conclusions. The use of AC2 to stabilize coconut oil and PEG, as well as AC3 to stabilize PEG in concentrations up to 2.5 % ensure efficient operation of HSM in an environment with low thermal conductivity (lightweight concrete) and allow sorption of up to 80 % PEG and up to 50 % coconut oil, which significantly exceeds the sorption capacity of widespread carriers for HSM. Also, one of the main advantages of the selected media is the preservation of high strength values of lightweight concrete during flexing and compression.

KEYWORDS: heat storage materials, energy conservation, passive thermoregulation, high-strength lightweight concrete, cenospheres, polyethylene glycol 600, coconut oil, activated carbon

Acknowledgements. The work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FSWG-2026-0003.

FOR CITATION: Sokolnikova S.R., Inozemtcev A.S. Stabilization of heat-storage material using a carbon carrier in high-strength lightweight concrete. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(4):577-591. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.577-591 (rus.).

Corresponding author: Sofia R. Sokolnikova, srsokolnikova@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Применение термоаккумулирующих материалов (ТАМ), работающих на основе фазовых переходов, в строительстве способствует снижению потребности в энергии для отопления и кондиционирования зданий [1]. Подобные ТАМ дают возможность накапливать и высвобождать тепловую энергию за счет процесса перехода из одного фазового состояния в другое в требуемом диапазоне температур, как правило, для строительных материалов используется переход из твердой фазы в жидкую фазу (плавление), характеризующийся поглощением энергии, и обратный переход из жидкой фазы в твердую (кристаллизация), характеризующийся выделением энергии [2]. Здания, построенные с использованием технологии ТАМ, позволяют аккумулировать избытки тепла, неизбежно возникающие из-за несовершенства систем отопления и кондиционирования, и впоследствии высвобождать накопленное ранее тепло при понижении температуры. Установлено, что экономия энергии с применением строительных материалов с ТАМ может достигать 57 % [3, 4].

Проведено большое количество исследований, посвященных выбору ТАМ, наибольшую эффективность в строительных материалах показали органические ТАМ — соединения на основе парафина, жирные кислоты, в том числе их сочетания (кокосовое масло, соевое масло), полимеры, такие как полиэтиленгликоль (ПЭГ), благодаря следующим свойствам: высокая энергия фазового перехода, термическая и химическая стабильность, низкое давление паров, низкое значение «переохлаждения» или его отсутствие [5].

В большинстве работ рассматривается использование ТАМ в составе бетона ввиду широкой распространенности данного строительного материала. Прямое включение ТАМ в состав бетона ограничено, так как приводит к снижению физико-механических свойств материала [6], поэтому применяются методы, ограничивающие контакт ТАМ с продуктами гидратации цемента, такие как пропитка легких пористых заполнителей [7], стабилизация формы

ТАМ в мелкодисперсных пористых материалах [8], микрокапсуляция в основном с использованием пластика [9], макрокапсуляция с применением труб или контейнеров [5].

Среди множества видов бетонов, разработанных на сегодняшний день, стоит выделить высокопрочный легкий бетон на полых алюмосиликатных микросферах, обладающий прочностью 40–70 МПа при плотности 1300–1500 кг/м³ и отличающийся не только высокой удельной прочностью, но и высокой морозо- и водостойкостью [10], что делает этот материал перспективным в строительстве.

Высокопрочный легкий бетон с применением ТАМ — это инновационный материал, позволяющий создавать уникальные здания и сооружения, отвечающие современным требованиям, с уменьшением затрат за счет экономии на объеме материала, а также экономии энергозатрат из-за низкой теплопроводности и функции термоаккумуляции в необходимом диапазоне температур. За счет низкой плотности и высокой прочности возможно возведение небоскребов с упрощенной конструкцией и с меньшими затратами по сравнению с применением традиционных тяжелых бетонов. Также не менее перспективно использование термоаккумулирующего высокопрочного легкого бетона в 3D-печати зданий благодаря низкой массе и высокой прочности, что упрощает и оптимизирует технологию аддитивного строительного производства. Сочетание низкой теплопроводности и «умного» режима терморегуляции позволяет экономить энергоресурсы и повышать тепловой комфорт посредством уменьшения колебаний температур в зданиях и сооружениях. Таким образом, высокопрочный легкий бетон с применением ТАМ — это многофункциональный материал, отличающийся высокой прочностью, низкой массой, низкой теплопроводностью и обладающий термоаккумулирующими свойствами с требуемым диапазоном температур.

Для создания высокопрочного легкого бетона с термоаккумулирующими свойствами возможно использование только одного метода, ограничива-

ющего контакт ТАМ с продуктами гидратации цемента — стабилизация формы в мелкодисперсных пористых материалах, так как применение легкого крупного заполнителя ограничено в связи с его низкой прочностью, метод микрокапсулирования ТАМ также значительно снижает прочность бетона, а метод макрокапсулирования не является функциональным и теплоэффективным [11]. Помимо этого, для эффективного протекания фазовых переходов ТАМ и полного выделения/поглощения энергии в среде с низкой теплопроводностью (легком бетоне) необходимо создание высокотеплопроводных связей между частицами ТАМ. Создание подобных связей возможно с применением метода стабилизации в носителях с высокой теплопроводностью либо требуется применение дополнительных добавок, как правило нанодобавок, повышающих теплопроводность композита носитель-ТАМ, что неизбежно повышает стоимость композита [12].

Для стабилизации формы ТАМ используют мелкодисперсные пористые материалы, такие как бентонит [13], пемза [14], диатомит [15], микрокремнезем [16, 17] и др. Чтобы предотвратить «утечку» ТАМ из носителя, необходимо определить максимальную концентрацию ТАМ таким образом, чтобы жидкие ТАМ могли удерживаться в носителе за счет адсорбции или поверхностного натяжения [18]. В связи с этим одним из основных требований к компоненту-носителю является высокая сорбционная способность.

Следовательно, в качестве носителя необходим материал, обладающий высокой сорбционной способностью, высокой теплопроводностью, химической стабильностью, а также отсутствием отрицательного воздействия на процесс гидратации цемента. Указанным свойствам удовлетворяет активированный уголь [19]. Это материал на основе графита с высокоразвитой пористой структурой (особенно в микро- и мезодиапазонах). Структура активированного угля образована сетками трехмерного расположения графеновых слоев, в которых поры сформированы из свободных пространств внутри трехмерных блоков. Наложение наноразмерных графитовых листов формирует нанометровую шкалу мелкодисперсных упорядоченных микрографитов в активированном угле [20]. Активированный уголь обладает высокой пористостью в широком диапазоне размеров пор, что объясняет его высокую сорбционную способность. Ввиду высокой теплопроводности графита возможно создание композита с высокой теплопроводностью при условии достаточного заполнения пор активированного угля ТАМ [21], что позволит ускорить процессы фазовых переходов ТАМ в носителе.

Проведено достаточное количество исследований, посвященных стабилизации формы ТАМ в активированных углях, однако число работ, рассматривающих вопрос применения композита активированный уголь-ТАМ в бетоне, ограничено [18, 22, 23].

Цель настоящего исследования — разработка инновационного строительного материала на основе высокопрочного легкого бетона на полых микросферах с применением ТАМ (ПЭГ и кокосовое масло), стабилизированных в углеродном носителе (активированные угли). Противоречивой задачей при этом является обеспечение функционирования ТАМ в объеме высокопрочного легкого бетона D1400 с низкой теплопроводностью при сохранении прочностных свойств.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы. Состав высокопрочного легкого бетона включал:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5 (АО «ЦЕМРОС», г. Москва, Россия);
- полые алюмосиликатные микросферы Fore-Sphere (г. Екатеринбург, Россия);
- комплексная кремнеземистая добавка FREM SILICA (ЗАО «Завод добавок и смазок «ФРЭЙМ», Республика Беларусь);
- фракционный кварцевый песок фр. 0,16–0,63 мм;
- кварцевая мука, полученная путем помола до $S_{уд} = 700 \pm 20 \text{ м}^2/\text{кг}$;
- поликарбоксилатный пластификатор Melflux 2651F;
- вода;
- в качестве носителя для ТАМ использовался активированный уголь трех марок: УГ1 — размер частиц 60–100 мкм; УГ2 — размер частиц 100–1000 мкм; УГ3 — размер частиц 60–315 мкм.

Соотношение компонентов смеси соответствовало проектной средней плотности бетона 1400 кг/м^3 в соответствии с работой [10]. Содержание активированного угля варьировалось в количестве 1; 2,5; 5 и 7,5 % от массы цемента.

В качестве ТАМ использовались ПЭГ 600 (ООО «Капролактам ТОСОЛ-СИНТЕЗ», г. Дзержинск, Россия) и кокосовое масло Nutley (г. Набережные Челны, Россия) с температурой фазового перехода 19,0–24,5 °C.

Методы. Стабилизирование ТАМ осуществлялось путем пропитки минерального носителя — активированного угля — при его нагревании. Для этого активированный уголь, высушенный до постоянной массы, перемешивался с ТАМ, предварительно нагретыми до 40 °C, и выдерживался при такой температуре в течение двух часов. Полученные композиции выдерживались при температуре $25 \pm 3 \text{ °C}$ 12 ч.

Для определения максимального содержания ТАМ, надежно удерживаемых в составе носителя, использовался тест на фильтровальной бумаге [24]. Для этого полученные композиции помещались на фильтровальную бумагу и подвергались нагреву до 75 °C в течение 5 ч. Максимальное содержание ТАМ, надежно удерживаемых в носителе, устанавли-

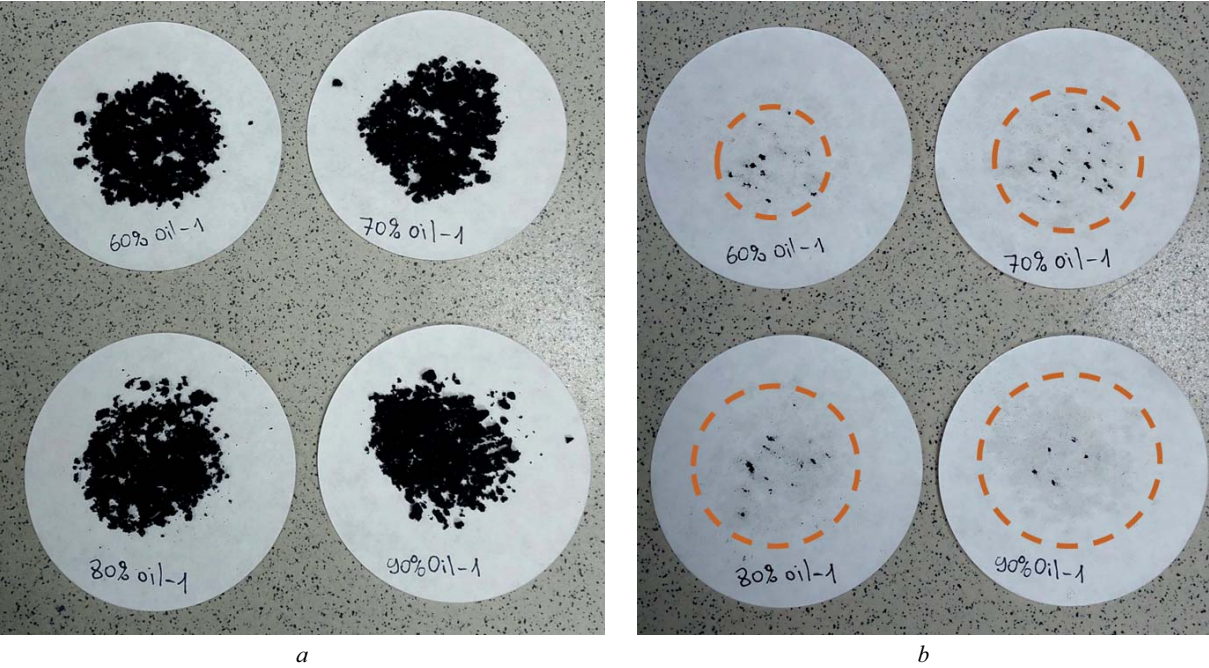


Рис. 1. Методика определения максимального содержания ТАМ, надежно удерживаемых в составе носителя, с помощью теста на фильтровальной бумаге: *a* — до испытания; *b* — после испытания (пятно ТАМ выделено прерывистой линией)

Fig. 1. Determination of the maximum HSM content securely contained in the carrier using a test on filter paper: *a* — before the test; *b* — after the test (the spot of HSM is highlighted by an intermittent line)

ливалось по изменению массы фильтровальной бумаги после нагрева (рис. 1).

Активированный уголь является добавкой с высокой водопотребностью [19], в связи с этим для обеспечения хорошей удобоукладываемости смеси при увеличении концентрации активированного угля было увеличено водоцементное отношение (В/Ц) таким образом, чтобы подвижность смеси составляла 155 ± 5 мм. Определение подвижности проводилось по диаметру расплыва смесей из усеченного конуса (начальный диаметр основания — 101,5 мм) после 30 встряхиваний на встряхивающем столике.

Для установления прочности бетонов изготовлены образцы-балочки размером $40 \times 40 \times 160$ мм. Образцы твердели при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности 95 ± 5 %. Предел прочности при изгибе и сжатии определялся на 28 сут тверде-

ния с помощью испытательной машины Advantest 9 (Controls, Италия).

Определение теплопроводности образцов высокопрочного легкого бетона выполнялось на оборудовании Linseis THB-1 при температуре $23,8 \pm 0,3$ °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Так как объем порового пространства и поверхности у материала носителя отличается, установлено максимальное количество ТАМ, которое он способен поглотить и удержать. С помощью нагревания носителей со стабилизированными ТАМ на фильтровальной бумаге установлены максимальные концентрации ТАМ, результаты испытаний представлены в таблице. При отделении менее 0,5 % ТАМ было принято, что при данной концентрации ТАМ надежно удерживается в составе носителя.

Результаты определения максимальных концентраций ТАМ в составе носителей

The results of determining the maximum concentrations of HSM in the composition of carriers

Наименование ТАМ Name of HSM	Количество ТАМ $C_{\text{ТАМ}}$, % от массы активированного угля Amount of HSM C_{HSM} , % by weight of activated carbon	Количество ТАМ, отделившихся от носителя δ , % The amount of HSM separated from the carrier δ , %		
		УГ1 / AC1	УГ2 / AC2	УГ3 / AC3
ПЭГ 600 PEG 600	80	0,5	0,5	0,4
	90	1,2	1,1	1,1
	100	1,4	1,3	1,4

Окончание табл. / End of the Table

Наименование ТАМ Name of HSM	Количество ТАМ $C_{ТАМ}$, % от массы активированного угля Amount of HSM C_{HSM} , % by weight of activated carbon	Количество ТАМ, отделившихся от носителя δ , % The amount of HSM separated from the carrier δ , %		
		УГ1 / AC1	УГ2 / AC2	УГ3 / AC3
Кокосовое масло Coconut oil	50	0,4	0,4	0,5
	60	1,5	1,4	1,5
	70	2,4	2,0	1,8

Анализ полученных данных показывает, что количество ТАМ, отделившихся от носителя после нагрева, составляет 0,5–1,4 % для ПЭГ 600 и 0,4–2,4 % для кокосового масла, т.е. исследуемые марки активированных углей обладают схожей сорбционной способностью. При этом она зависит от вида ТАМ. Максимальная концентрация, при которой отделение ТАМ не превышает 0,5 %, составила 80 %

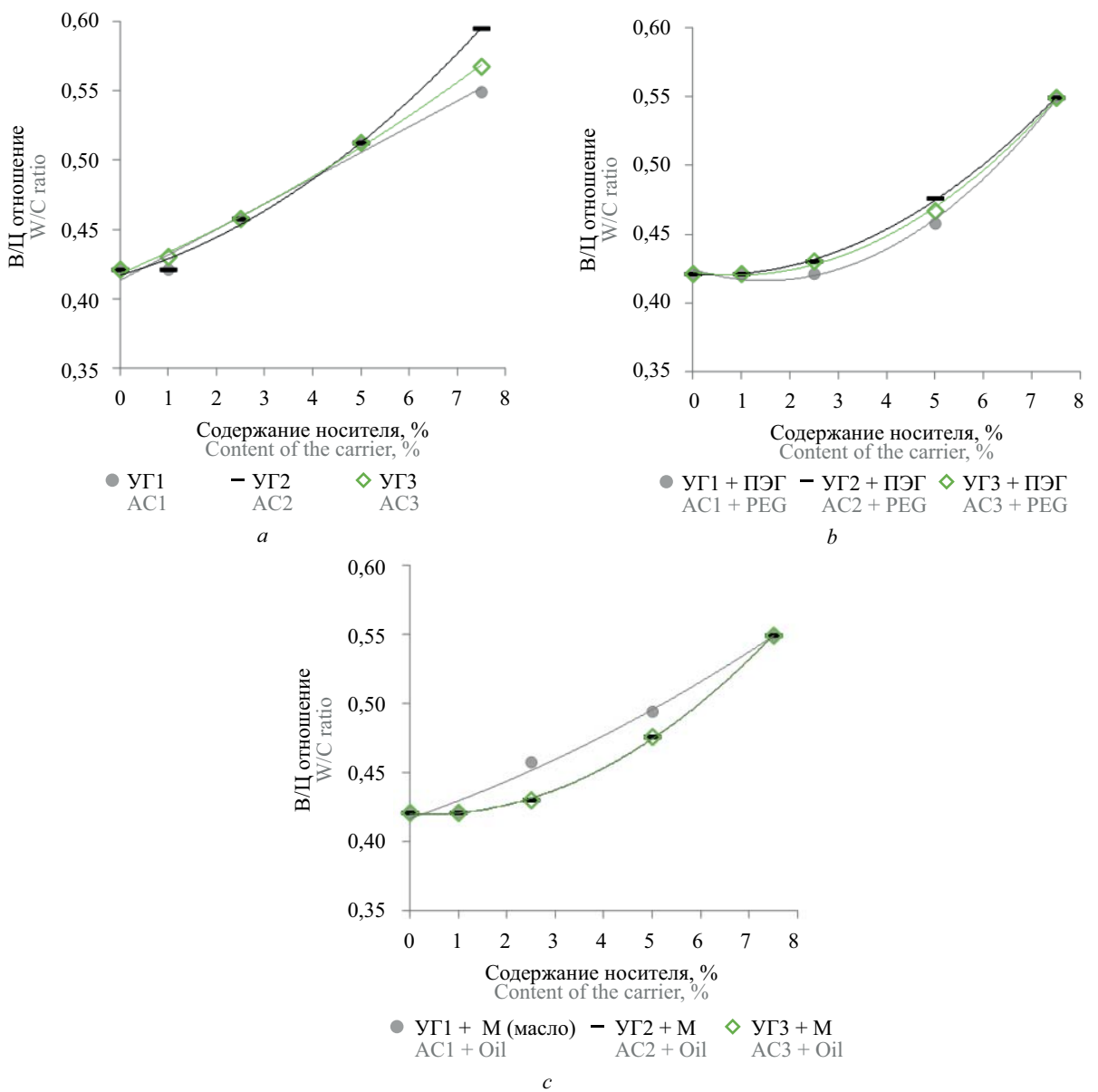


Рис. 2. Изменение В/Ц отношения бетонных смесей от содержания носителей: *а* — без ТАМ; *б* — с ПЭГ; *с* — с кокосовым маслом

Fig. 2. Changes in the W/C ratio of concrete mixtures with an increase in the content of carriers: *a* — without HSM; *b* — with PEG; *c* — with coconut oil

от массы угля для ПЭГ 600, кокосового масла — 50 % независимо от марок углей. Стоит отметить высокую сорбционную способность исследуемых активированных углей, по сравнению с другими носителями при использовании прямой (не вакуумной) сорбции, так, сорбционная способность носителей для ПЭГ составила: бентонит — 43 % [13], пемза — до 56 % [14], диатомит — 50 % [15].

Очевидно, что введение тонких добавок, таких как активированный уголь, приводит к снижению подвижности бетонных смесей. При этом количество добавляемой воды, необходимое для сохранения текучести системы, указывает на количество свободных пор носителя, не заполненных ТАМ. Таким образом, можно провести оценку эффективно-

сти сорбции ТАМ исследуемыми марками активированных углей. Выполнена оценка изменения В/Ц бетонных смесей для трех марок активированных углей без ТАМ (рис. 2, а), со стабилизированным в них ПЭГ (рис. 2, б) и кокосовым маслом (рис. 2, с).

Как видно из рис. 2, введение активированных углей в состав мелкозернистого состава высокопрочного легкого бетона для всех его марок приводит к схожему характеру изменения В/Ц. В диапазоне концентраций носителей 0,0–5,0 % для достижения равноподвижной смеси В/Ц изменяется с 0,42 до 0,51. Увеличение концентрации до 7,5 % приводит к увеличению В/Ц до 0,55 для УГ1, 0,59 для УГ2 и 0,57 для УГ3 соответственно. Подобный эффект может быть связан с отличием в дисперсности ис-

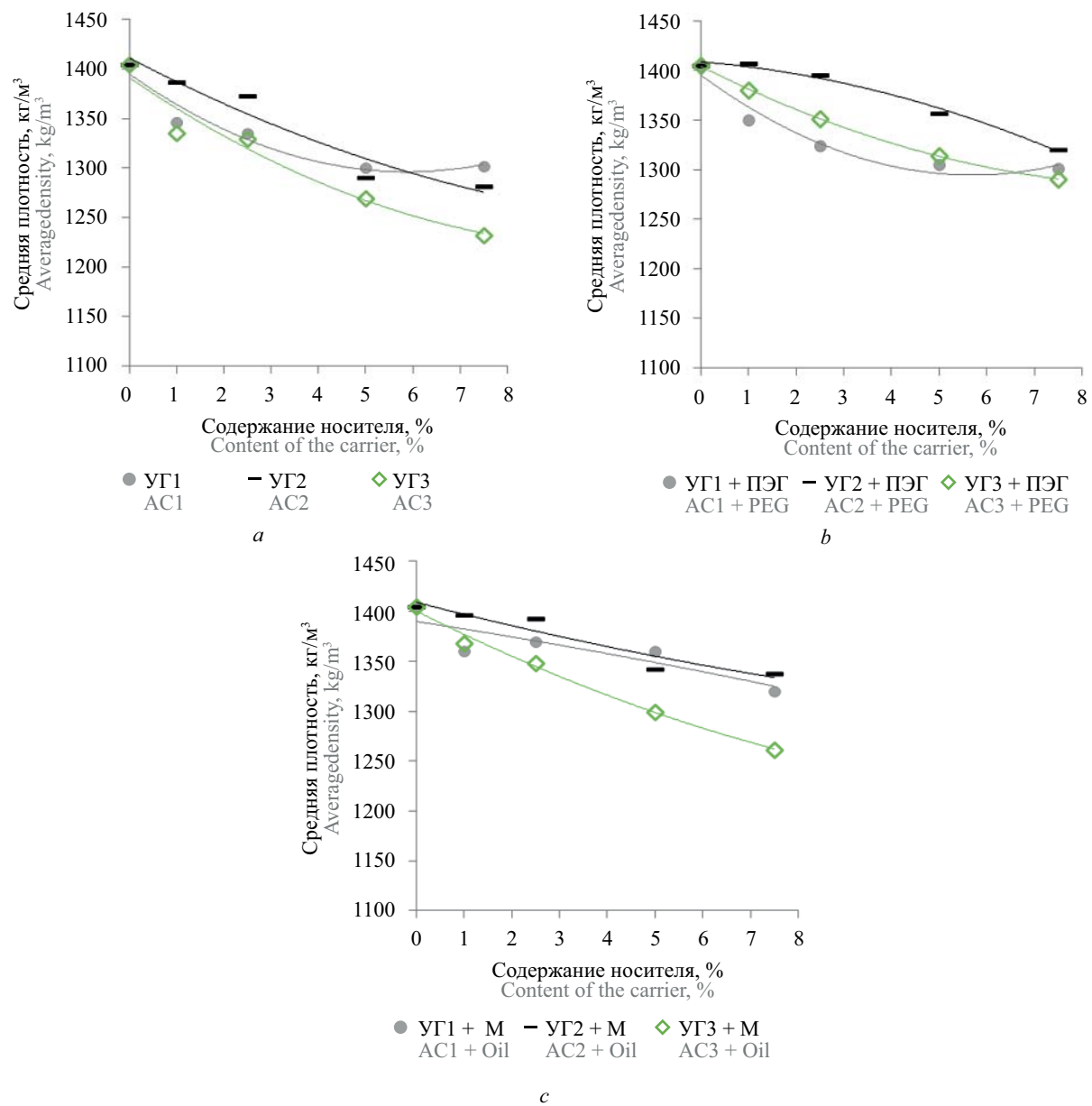


Рис. 3. Зависимость средней плотности бетона от содержания носителя: а — без ТАМ; б — с ПЭГ; с — с кокосовым маслом

Fig. 3. Change in the average density of concrete specimens: a — without HSM; b — with PEG; c — with coconut oil

следуемых марок активированных углей. Так, УГ1 обладает наименьшим средним размером частиц, а УГ2 — наибольшим.

При стабилизации ПЭГ в активированных углях графики изменения В/Ц (рис. 2, б) отличаются ярко выраженной криволинейной зависимостью от концентрации носителей. Видно, что при концентрации носителей 1,0 % В/Ц не изменяется и соответствует значению контрольного образца (0,42) для каждого из носителей. Наименьшей водопотребностью из всех исследуемых углей в диапазоне концентраций носителя 2,5–5,0 % характеризуется марка УГ1, а наибольшей — УГ2. Отметим, что при концентрации носителя 7,5 % для достижения диаметра распыла 155 ± 5 мм требуется одинаковое количество воды (В/Ц = 0,55) для всех марок углей. Меньшая водопотребность бетонных смесей при использовании ПЭГ обусловлена, в первую очередь, снижением количества свободного порового пространства в структуре минерального носителя (содержание ПЭГ составило 80 %). В результате объем, который может быть насыщен водой из бетонной смеси, уменьшается. С другой стороны, ПЭГ обладает пластифицирующим эффектом [25], таким образом, меньшая водопотребность с ПЭГ может свидетельствовать о его отделении от носителя. Здесь необходима оценка изменения плотности и прочности образцов.

На рис. 2, с показано, что стабилизация кокосового масла в активированном угле характеризуется следующим влиянием на водопотребность бетонных смесей: наибольшим В/Ц в диапазоне концентраций носителей 2,5–5,0 % обладают составы с УГ1 (при содержании носителя 2,5 % В/Ц = 0,46, а при 5,0 % — 0,49). Марки углей УГ2 и УГ3 описываются одинаковым влиянием: расход воды во всем исследуемом диапазоне составляет В/Ц = 0,42, 0,43 и 0,48 для концентраций носителя 1,0, 2,5 и 5,0 % соответственно. При максимальной концентрации каждого из углей с кокосовым маслом В/Ц для смесей также составляет 0,55. Увеличенная водопотребность бетонных смесей при использовании УГ1 со стабилизированным кокосовым маслом может быть связана с недостаточной сорбционной способностью этой марки, сопряженной, вероятно, с высокой вязкостью ТАМ и малым размером пор в структуре носителя. То есть в угле остается большое количество свободных (не занятых кокосовым маслом) пор, участвующих в сорбции воды из бетонной смеси.

В результате анализа изменения В/Ц установлено, что УГ2 и УГ3 эффективно удерживают оба вида термоаккумулирующего материала.

Введение минеральных носителей ТАМ из-за высокой пористости закономерно является источником дополнительного объема пустот в структуре плотной матрицы высокопрочного легкого бетона. Влияние активированных углей на среднюю плотность исследуемых бетонов показано на рис. 3.

Анализ представленных графиков показывает, что при использовании активированных углей до концентраций 2,5 % без ТАМ наименьшей плотностью, которая достигает 1330 кг/м^3 , обладают образцы с УГ3, а наибольшей — УГ2 (средняя плотность 1373 кг/м^3). Наличие в составе углей ПЭГ приводит к повышению средней плотности образцов с УГ2 в сравнении с образцами без ТАМ (рис. 3, б). При этом данный показатель остается практически неизменным по отношению к контрольному образцу до концентраций носителя 2,5 %. Это свидетельствует об эффективной сорбции указанного ТАМ выбранным носителем. При повышении концентрации до 7,5 % средняя плотность снижается на 100 кг/м^3 . Подобный эффект закономерен ввиду высокой концентрации пористой добавки-носителя. При применении УГ3 с ПЭГ средняя плотность по сравнению с образцами без ТАМ увеличивается и составляет около 1350 кг/м^3 при концентрациях 2,5 %, что является достаточно близким значением к контрольному образцу — 1405 кг/м^3 . В случае увеличения концентрации до 7,5 % средняя плотность снижается до 1290 кг/м^3 . Использование УГ1 с ПЭГ существенно не влияет на изменение средней плотности по отношению к образцам без ТАМ, что может свидетельствовать о низкой удерживающей способности носителя, т.е. ПЭГ вытекает из пор активированного угля.

Использование кокосового масла в составе УГ2 не способствует изменению средней плотности бетона — предельная концентрация такого влияния 2,5 %, что подтверждает эффективность сорбции ТАМ. Избыток минерального носителя, наполненного кокосовым маслом, приводит к снижению средней плотности до значений около 1340 кг/м^3 (при концентрации активированного угля 7,5 %). Отметим, что средняя плотность бетона с кокосовым маслом значительно увеличилась по сравнению с образцами без ТАМ для носителя УГ1, несмотря на повышенное значение В/Ц, в отличие от составов с УГ2 и УГ3. Наименьшую среднюю плотность имеют образцы с применением УГ3, насыщенные кокосовым маслом, при его содержании до 7,5 % (около 1260 кг/м^3), что можно объяснить ухудшающейся удобоукладываемостью.

Ключевым фактором, осложняющим реализацию процессов фазового перехода термоаккумулирующего материала, служит теплопроводность среды, в которой он распределен. Как показано выше, высокопрочные легкие бетоны имеют низкую среднюю плотность, что, в отличие от плотных бетонов, формирует худшие условия для ТАМ. В этом случае высокая теплопроводность носителя является одним из основных требований к нему для обеспечения эффективного протекания процесса фазового перехода [26]. Активированный уголь, состоящий на 87–97 % из графита, обладает высокой теплопроводностью при заполнении пор угля.

Исходя из этого, такой носитель может выступать в качестве модификатора, формирующего пространственный каркас для распространения тепла между распределенными объемами ТАМ. Возникновение такого эффекта можно оценить по величине теплопроводности бетонов с различными концентрациями активированных углей (рис. 4).

На графиках, представленных на рис. 4, наблюдается общая тенденция изменения теплопроводности легких бетонов с носителем марки УГ2 и УГ3, для которых фиксируется увеличение этого показателя относительно значений контрольного образца при содержании не более 2,5 и 1,0 % соответственно. Наибольшее увеличение теплопроводности с 0,57 до 0,60 Вт/(м·К) имеют составы с УГ2 как без ТАМ,

так и для ПЭГ при концентрации носителя 1,0 %, а также при использовании 2,5 % УГ2 для стабилизации коксового масла. При использовании УГ3 теплопроводность увеличилась менее существенно до 0,58 Вт/(м·К) для образцов без ТАМ и с коксовым маслом, а для образцов с ПЭГ теплопроводность увеличилась до 0,59 Вт/(м·К) при концентрации 2,5 %. Дальнейшее снижение теплопроводности при увеличении концентраций носителей объясняется конкурирующим эффектом от снижения средней плотности бетонов. Отметим отсутствие положительного эффекта от применения УГ1, для которого обнаруживается снижение теплопроводности во всем диапазоне концентраций носителя независимо от вида ТАМ.

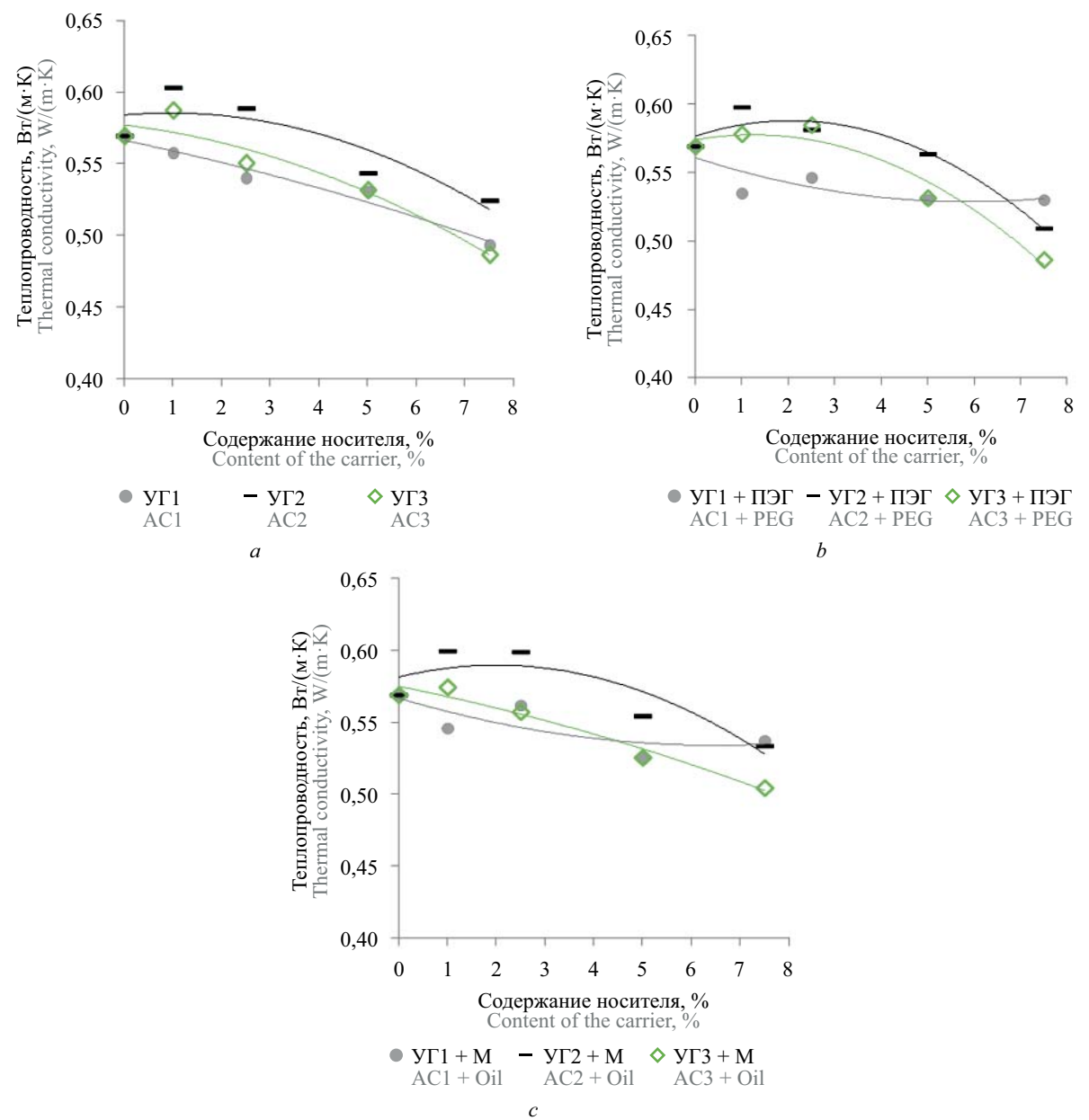


Рис. 4. Зависимость теплопроводности бетона от содержания носителя: а — без ТАМ; б — с ПЭГ; в — с коксовым маслом

Fig. 4. Thermal conductivity of concrete specimens: a — without HSM; b — with PEG; c — with coconut oil

Важным условием придания дополнительных термоаккумулирующих свойств легкому бетону служит сохранение его исходных прочностных свойств. Влияние ТАМ на прочность при изгибе и сжатии представлено на рис. 5, 6 соответственно.

Зависимости на рис. 5 показывают общую тенденцию к снижению прочности при изгибе при увеличении концентрации носителя. Исключением являются образцы УГ2 и УГ3 с ПЭГ (рис. 5, *b*). Видно увеличение прочности при изгибе от содержания минерального носителя с 5,1 до 6,2 МПа для составов УГ2 + ПЭГ и до 5,4 МПа для УГ3 + ПЭГ. Отсутствие негативного эффекта указывает на высокую эффективность сорбции ПЭГ этими марками угля, т.е. на незначительное вытекание ТАМ. Кроме того, из-

вестно [27–29], что ПЭГ в небольших концентрациях (не более 2 %) положительно влияет на прочностные характеристики бетона. При использовании в качестве носителя УГ1 прочность при изгибе снижается до 4,2 МПа, что может быть обусловлено вытеканием ПЭГ из носителя в достаточно больших объемах и его препятствием гидратации цемента. Применение активированных углей без ТАМ приводит к снижению прочности бетона при концентрации носителя 7,5 % до 4,4; 4,7 и 3,9 МПа для УГ1; УГ2 и УГ3 соответственно. Подобное снижение прочности может объясняться сниженной средней плотностью бетона при увеличении концентрации носителей. В случае стабилизации коксового масла в носителях прочность при изгибе бетона снижается до сопоставимых

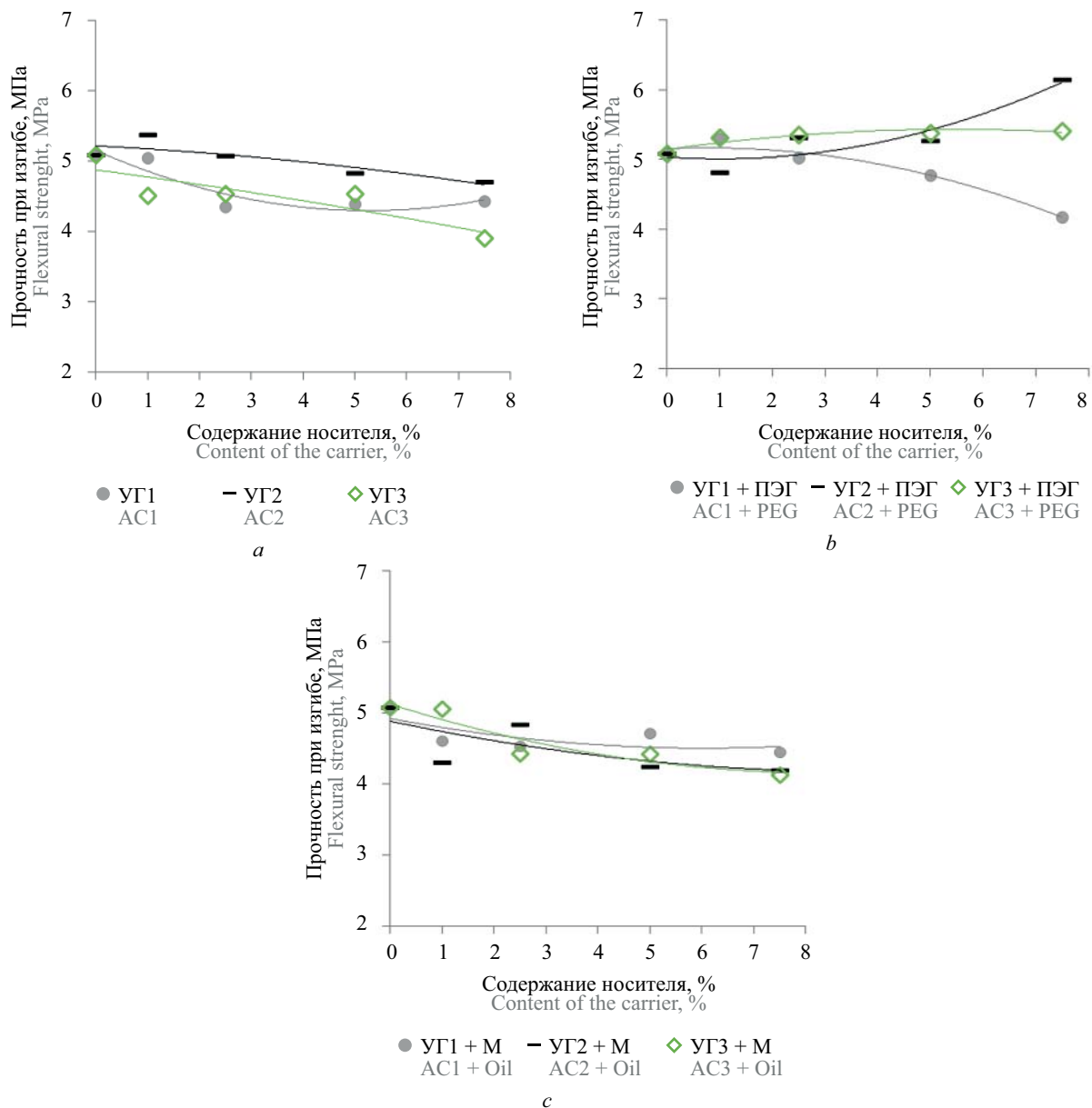


Рис. 5. Зависимость прочности при изгибе бетона от содержания носителя: *a* — без ТАМ; *b* — с ПЭГ; *c* — с коксовым маслом

Fig. 5. Flexural strength of concrete specimens: *a* — without HSM; *b* — with PEG; *c* — with coconut oil

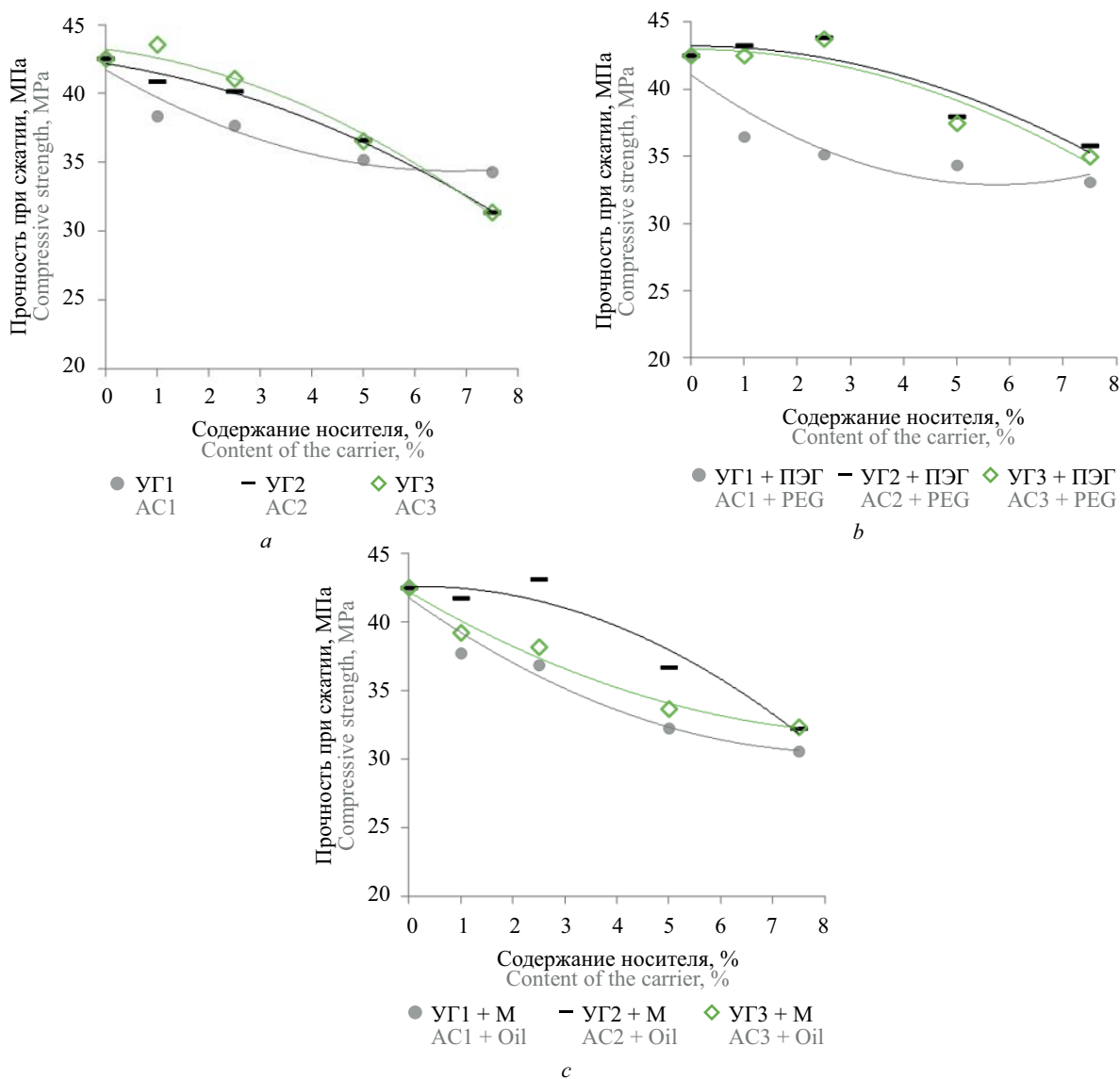


Рис. 6. Зависимость прочности при сжатии бетона от содержания носителя: *a* — без ТАМ; *b* — с ПЭГ; *c* — с кокосовым маслом

Fig. 6. Compressive strength of concrete specimens: *a* — without TAM; *b* — with PEG; *c* — with coconut oil

значений — 4,5; 4,2 и 4,1 МПа для УГ1; УГ2 и УГ3 соответственно. Так как масло не оказывает положительного воздействия на прочность при изгибе бетона, а влияние на прочность схоже с составами без ТАМ, можно сделать вывод о высокой сорбционной способности активированных углей к маслу.

Представленные зависимости показывают, что использование активированных углей без ТАМ (рис. 6, *a*) приводит к снижению прочности при сжатии бетона. При этом для УГ2 и УГ3 до концентраций носителей 2,5 % наблюдается незначительное (не более чем 3,3 %) снижение до 41,1 и 43,6 МПа (на 2,6 %) для концентрации 1,0 % УГ3. При этом средняя плотность (рис. 3, *a*) снизилась на 2,3 % для 2,5 % УГ2, на 4,9 и 5,3 % для 1,0 и 2,5 % УГ3 соответственно. При использовании УГ1 наблюдается значительное снижение прочности бетона при сжатии на всем про-

межутке концентраций. Подобное снижение прочности может быть вызвано агрегацией тонкодисперсных частиц УГ1 с образованием пустот и высокой сорбционной способностью этих агрегатов.

При стабилизации ПЭГ в УГ1 (рис. 6, *b*) отмечается снижение прочности во всем диапазоне концентраций. Так, при концентрации 1,0 % прочность при сжатии снижается до 36,5 МПа или на 14,1 %. Однако при стабилизации ПЭГ в УГ2 и УГ3 при концентрации до 2,5 % фиксируется увеличение прочности при сжатии по сравнению с контрольным образцом до 43,8 МПа или на 3 %. Для этих составов не наблюдается существенное снижение средней плотности, величина которой изменяется не более чем на 1,8 %. В совокупности это подтверждает высокую сорбционную способность данных марок угля к ПЭГ. Увеличение содержания носителей приводит

к снижению прочности при сжатии до 35,8 и 35 МПа (на 15,8 и на 17,6 %) для УГ2 и УГ3 соответственно. Указанное согласуется с влиянием носителей на среднюю плотность (рис. 3, *b*), которая составила около 1300 и 1290 кг/м³, что на 7,4 и 8,5 % соответственно ниже значений контрольного состава.

Составы бетона с активированным углем УГ2 и кокосовым маслом (рис. 6, *c*) имеют наибольшую прочность (43,2 МПа) при концентрации до 2,5 %. Наименьшую прочность показали составы с УГ1 + М, которые при концентрации носителя 1,0 % имеют прочность 37,8 МПа, что составляет снижение 11,1 %. Также достаточно существенное снижение (до 39,3 МПа или на 7,5 %) прочности при сжатии продемонстрировали составы с УГ3 + М при использовании 1,0 % носителя. Это обусловлено низкой средней плотностью искусственного камня по сравнению с образцами с другими носителями, а также отсутствием положительного влияния масла на гидратацию цемента.

Проведенные исследования показывают эффективность применения в качестве носителя активированного угля марки УГ2 концентрации до 2,5 % для исследуемых термоаккумулирующих материалов (ПЭГ и кокосового масла). Уголь марки УГ3 может быть использован для сорбции ПЭГ в концентрации до 2,5 % в составе высокопрочного легкого бетона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложен метод стабилизации ТАМ в порошковом активированном угле, который наряду с доступностью и нетоксичностью обладает высокой сорбционной способностью (на 30–40 % эффективнее большинства носителей), при этом обеспечивает высокую теплопроводность при заполнении пор термоаккумулирующим материалом. В качестве ТАМ могут быть использованы полиэтиленгликоль и кокосовое масло, обеспечивающие фазовый переход в оптимальном для большинства регионов России диапазоне температур 19,0–24,5 °С.

В ходе проведения настоящего исследования получены следующие результаты:

1. Активированные угли исследуемых марок имеют высокий сорбционный потенциал, способны эффективно удерживать до 80 % массы ПЭГ, в сравнении с сорбционной способностью бентонита, пемзы, диатомита — менее 56 % [13–15].

2. Определено влияние различных марок и концентраций активированных углей в зависимости от вида ТАМ на водопотребность смеси высокопрочного легкого бетона. Установлено, что при увеличении концентрации носителей до 7,5 % В/Ц бетон-

ной смеси увеличивается с 0,42 до 0,55; 0,59 и 0,57 для УГ1; УГ2 и УГ3 соответственно.

3. Средняя плотность бетона при увеличении концентрации добавок уменьшается, при этом в случае стабилизации ПЭГ наименьшей плотностью на всем диапазоне концентраций обладали образцы с УГ1, наибольшей — УГ2. При стабилизации кокосового масла наименьшую плотность показали образцы с УГ3.

4. Теплопроводность образцов бетона при стабилизации ПЭГ увеличивается при использовании УГ2 и УГ3 до концентраций 2,5 %. В случае применения УГ1 теплопроводность снижается на всем диапазоне концентраций. При стабилизации кокосового масла наибольшей теплопроводностью, превосходящей значения контрольного образца, обладали образцы с УГ2 до концентрации 2,5 %, образцы с УГ3 показали увеличение теплопроводности до концентрации 1,0 %. При использовании УГ1 для стабилизации масла теплопроводность, как и в случае с ПЭГ, снижается на всем диапазоне концентраций носителя.

5. Прочность при изгибе при стабилизации ПЭГ увеличивается с увеличением концентрации носителей при использовании УГ2 и УГ3 с 5,1 до 6,2 МПа и до 5,4 МПа соответственно. При стабилизации кокосового масла наблюдается снижение прочности всех образцов до значений 4,1–4,5 МПа.

6. Применение активированного угля УГ2 в бетоне до концентраций 2,5 % для стабилизации кокосового масла и ПЭГ позволяет сохранить высокие значения прочности при сжатии легкого бетона — до 43,2–43,8 МПа. Также для стабилизации ПЭГ эффективно использование носителя УГ3 до концентрации 2,5 %, прочность сохраняет высокие значения — 43,8 МПа.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что применение носителей УГ2 для стабилизации кокосового масла и ПЭГ, а также УГ3 для стабилизации ПЭГ в концентрациях до 2,5 % обеспечивает эффективную работу ТАМ в среде с низкой теплопроводностью (легком бетоне D1400). Достижимый эффект реализуется за счет создания высокотеплопроводного каркаса из УГ в структуре бетона, который дает возможность сорбировать до 80 % ПЭГ и до 50 % кокосового масла. При этом сохраняются высокие значения прочности легкого бетона при изгибе и сжатии.

Таким образом, разработана уникальная отечественная технология «умных» энергосберегающих бетонов прочностью более 40 МПа и средней плотностью менее 1400 кг/м³, способных обеспечивать пассивное поглощение/выделение энергии в диапазоне температур 19,0–24,5 °С.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Jahangir M.H., Ziyaei M., Kargarzadeh A.* Evaluation of thermal behavior and life cycle cost analysis of greenhouses with bio-phase change materials in multiple locations // *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 54. P. 105176. DOI: 10.1016/j.est.2022.105176. EDN MNSPFB.
2. *Sukontasukkul P., Uthaichotirat P., Sangpet T., Sisomphon K., Newlands M., Siripanichgorn A. et al.* Thermal properties of lightweight concrete incorporating high contents of phase change materials // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 207. Pp. 431–439. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.152
3. *Papadaki D., Foteinis S., Binas V., Assimakopoulos M.N., Tsoutsos T., Kiriakidis G.* A life cycle assessment of PCM and VIP in warm Mediterranean climates and their introduction as a strategy to promote energy savings and mitigate carbon emissions // *AIMS Materials Science*. 2019. Vol. 6. Issue 6. Pp. 944–959. DOI: 10.3934/mat.2019.6.944
4. *Al-Yasiri Q., Szabó M.* Thermal performance of concrete bricks based phase change material encapsulated by various aluminium containers: An experimental study under Iraqi hot climate conditions // *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 40. P. 102710. DOI: 10.1016/j.est.2021.102710. EDN UOYINL.
5. *Memon S.A., Cui H.Z., Zhang H., Xing F.* Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete // *Applied Energy*. 2015. Vol. 139. Pp. 43–55. DOI: 10.1016/J.APENERGY.2014.11.022
6. *Soares N., Costa J.J., Gaspar A.R., Santos P.* Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency // *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 59. Pp. 82–103. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.12.042
7. *Yang Y., Wu W., Fu S., Zhang H.* Study of a novel ceramsite-based shape-stabilized composite phase change material (PCM) for energy conservation in buildings // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 246. P. 118479. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118479. EDN MPCSYE.
8. *Chen Y., Ding H., Wang B., Shi Q., Gao J., Cui Z. et al.* Dopamine functionalization for improving crystallization behaviour of polyethylene glycol in shape-stable phase change material with silica fume as the matrix // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 208. Pp. 951–959. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.207
9. *Illampas R., Rigopoulos I., Ioannou I.* Influence of microencapsulated Phase Change Materials (PCMs) on the properties of polymer modified cementitious repair mortar // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 40. P. 102328. DOI: 10.1016/j.job.2021.102328. EDN VIMPNC.
10. *Иноземцев А.С., Королев Е.В.* Высокопрочные легкие бетоны : монография. СПб. : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. 192 с. EDN UCJRAZ.
11. *Rathore P.K.S., Shukla Sh.K.* Potential of macro-encapsulated PCM for thermal energy storage in buildings : a comprehensive review // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 225. Pp. 723–744. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.221. EDN UMHSUT.
12. *Peng W., Sadaghiani O.K.* Thermal function improvement of phase-change material (PCM) using alumina nanoparticles in a circular-rectangular cavity using Lattice Boltzmann method // *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 37. P. 102493. DOI: 10.1016/j.est.2021.102493. EDN NVPLRG.
13. *Sari A.* Thermal energy storage characteristics of bentonite-based composite PCMs with enhanced thermal conductivity as novel thermal storage building materials // *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 117. Pp. 132–141. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.02.078
14. *Sari A., Hekimoglu G., Tyagi V.V., Sharma R.K.* Evaluation of pumice for development of low-cost and energy-efficient composite phase change materials and lab-scale thermoregulation performances of its cementitious plasters // *Energy*. 2020. Vol. 207. P. 118242. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118242. EDN INADMA.
15. *Karaman S., Karaipekli A., Sari A., Biçer A.* Polyethylene glycol (PEG)/diatomite composite as a novel form-stable phase change material for thermal energy storage // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011. Vol. 95. Issue 7. Pp. 1647–1653. DOI: 10.1016/J.SOLMAT.2011.01.022
16. *Mokhtari S., Madhkhani M.* The performance effect of PEG-silica fume as shape-stabilized phase change materials on mechanical and thermal properties of lightweight concrete panels // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. P. e01298. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01298
17. *Сокольникова С.Р., Иноземцев А.С.* Влияние полиэтиленгликоля, стабилизированного в микрокремнеземе, на прочность конструкционных легких бетонов // *Теория и практика повышения эффективности строительных материалов : мат. XIX Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, посвящ. памяти профессора В.И. Калашникова*. 2024. С. 146–153. EDN RUHYMN.
18. *Chin C.O., Yang X., Paul S.C., Susilawati, Wong L.S., Kong S.Y.* Development of thermal energy storage lightweight concrete using paraffin-oil palm kernel shell-activated carbon composite // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 261. P. 121227. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121227. EDN BARLQM.
19. *Zhang Y., Aslani F.* Development of fibre reinforced engineered cementitious composite using polyvinyl alcohol fibre and activated carbon powder

for 3D concrete printing // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 303. P. 124453. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124453. EDN QDSNSN.

20. Khadiran T., Zobir Hussein M., Zainal Z., Rusli R. Activated carbon derived from peat soil as a framework for the preparation of shape-stabilized phase change material // *Energy*. 2015. Vol. 82. Pp. 468–478. DOI: 10.1016/j.energy.2015.01.057

21. Chen Z., Shan F., Cao L., Fang G. Synthesis and thermal properties of shape-stabilized lauric acid/activated carbon composites as phase change materials for thermal energy storage // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2012. Vol. 102. Pp. 131–136. DOI: 10.1016/j.solmat.2012.03.013

22. Hekimoğlu G., Sari A., Gencel O., Önal Y., Ustaoglu A., Erdogmus E. et al. Thermal energy storage performance evaluation of bio-based phase change material/apricot kernel shell derived activated carbon in lightweight mortar // *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 73. P. 109122. DOI: 10.1016/j.est.2023.109122. EDN EJVXBF.

23. Zheng Ch., Huang Z., Wang D., Ju Z., Zhang Z., Zhang H. et al. Synthesis and properties of biomass derived carbon/PEG composite as photothermal conversion effective phase change material for functional concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2024. Vol. 149. P. 105495. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105495. EDN UKVHDQ.

24. Qu Yu., Chen J., Liu L., Xu T., Wu H., Zhou X. Study on properties of phase change foam concrete block mixed with paraffin / fumed silica composite phase change material // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 150.

Pp. 1127–1135. DOI: 10.1016/j.renene.2019.10.073. EDN YOCNUZ.

25. Kiran V.K., Sathyan D. Unveiling the combined influence of higher molecular weight polyethylene glycol and superplasticizer chemistry on fresh, mechanical, and microstructural performance of internally cured mortar // *Materials Research Express*. 2024. Vol. 11. Issue 7. P. 075502. DOI: 10.1088/2053-1591/ad5c30. EDN EMBEYY.

26. Tan Sh., Zhang X. Progress of research on phase change energy storage materials in their thermal conductivity // *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 61. P. 106772. DOI: 10.1016/j.est.2023.106772. EDN KHHCF0.

27. Makendran C. Study on self-curing concrete using Polyethylene Glycol 600 for highway infrastructure project // *Materials Today: Proceedings*. 2023. Vol. 80. Pp. 1677–1682. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.02.316. EDN JKCYPE.

28. Etman H.M., Elshikh M.M.Y., Kaloop M.R., Hu J.W., Abd ELMohsen I. Examination of the physical–mechanical properties of sustainable self-curing concrete using crushed ceramic, volcanic powder, and polyethylene glycol // *Sustainability*. 2024. Vol. 16. Issue 11. P. 4659. DOI: 10.3390/su16114659. EDN YQOEAO.

29. Gowdra Virupakshappa S., Shrishail Basappa A., Thimmarayappa M., Narayana Ch.K.N., Buradi A., Emma A.F. Modelling and analysis of strength and durability properties of internal curing concrete using PEG 400 and artificial neural network // *Discover Sustainability*. 2024. Vol. 5. Issue 1. P. 80. DOI: 10.1007/s43621-024-00240-3. EDN GCNJUW.

Поступила в редакцию 11 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 18 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 18 февраля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Софья Руслановна Сокольников** — аспирант, Институт промышленного и гражданского строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8761-0875, Scopus: 57222431488, ORCID: 0000-0002-0896-4512; srsokolnikova@mail.ru;

Александр Сергеевич Иноземцев — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, Институт промышленного и гражданского строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2444-1204, Scopus: 55889834500, ORCID: 0000-0001-7807-688X; inozemcevas@mgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Jahangir M.H., Ziyaci M., Kargarzadeh A. Evaluation of thermal behavior and life cycle cost analysis of greenhouses with bio-phase change materials in multiple locations. *Journal of Energy Storage*. 2022;

54:105176. DOI: 10.1016/j.est.2022.105176. EDN MNSPFB.

2. Sukontasukkul P., Uthaichotirat P., Sangpet T., Sisomphon K., Newlands M., Siripanichgorn A. et al.

Thermal properties of lightweight concrete incorporating high contents of phase change materials. *Construction and Building Materials*. 2019; 207:431-439. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.152

3. Papadaki D., Foteinis S., Binas V., Assimakopoulos M.N., Tsoutsos T., Kiriakidis G. A life cycle assessment of PCM and VIP in warm Mediterranean climates and their introduction as a strategy to promote energy savings and mitigate carbon emissions. *AIMS Materials Science*. 2019; 6(6):944-959. DOI: 10.3934/matserci.2019.6.944

4. Al-Yasiri Q., Szabó M. Thermal performance of concrete bricks based phase change material encapsulated by various aluminium containers: An experimental study under Iraqi hot climate conditions. *Journal of Energy Storage*. 2021; 40:102710. DOI: 10.1016/j.est.2021.102710. EDN UOYINL.

5. Memon S.A., Cui H.Z., Zhang H., Xing F. Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete. *Applied Energy*. 2015; 139:43-55. DOI: 10.1016/J.APENERGY.2014.11.022

6. Soares N., Costa J.J., Gaspar A.R., Santos P. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and Buildings*. 2013; 59:82-103. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.12.042

7. Yang Y., Wu W., Fu S., Zhang H. Study of a novel ceramsite-based shape-stabilized composite phase change material (PCM) for energy conservation in buildings. *Construction and Building Materials*. 2020; 246:118479. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118479. EDN MPCSYE.

8. Chen Y., Ding H., Wang B., Shi Q., Gao J., Cui Z. et al. Dopamine functionalization for improving crystallization behaviour of polyethylene glycol in shape-stable phase change material with silica fume as the matrix. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 208:951-959. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.207

9. Illampas R., Rigopoulos I., Ioannou I. Influence of microencapsulated Phase Change Materials (PCMs) on the properties of polymer modified cementitious repair mortar. *Journal of Building Engineering*. 2021; 40:102328. DOI: 10.1016/j.job.2021.102328. EDN VIMPNC.

10. Inozemtcev A. S., Korolev E.V. *High-strength lightweight concretes*. St. Petersburg, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2022; 192. EDN UCJRAZ. (rus.).

11. Rathore P.K.S., Shukla Sh.K. Potential of macro-encapsulated PCM for thermal energy storage in buildings : a comprehensive review. *Construction and Building Materials*. 2019; 225:723-744. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.221. EDN UMHSUT.

12. Peng W., Sadaghiani O.K. Thermal function improvement of phase-change material (PCM) using alumina nanoparticles in a circular-rectangular cavity

using Lattice Boltzmann method. *Journal of Energy Storage*. 2021; 37:102493. DOI: 10.1016/j.est.2021.102493. EDN NVPLRG.

13. Sarı A. Thermal energy storage characteristics of bentonite-based composite PCMs with enhanced thermal conductivity as novel thermal storage building materials. *Energy Conversion and Management*. 2016; 117:132-141. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.02.078

14. Sarı A., Hekimoglu G., Tyagi V.V., Sharma R.K. Evaluation of pumice for development of low-cost and energy-efficient composite phase change materials and lab-scale thermoregulation performances of its cementitious plasters. *Energy*. 2020; 207:118242. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118242. EDN INADMA.

15. Karaman S., Karaipekli A., Sarı A., Biçer A. Polyethylene glycol (PEG)/diatomite composite as a novel form-stable phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011; 95(7):1647-1653. DOI: 10.1016/J.SOLMAT.2011.01.022

16. Mokhtari S., Madhkhani M. The performance effect of PEG-silica fume as shape-stabilized phase change materials on mechanical and thermal properties of lightweight concrete panels. *Case Studies in Construction Materials*. 2022; 17:e01298. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01298

17. Sokolnikova S.R., Inozemtcev A.S. The effect of polyethylene glycol stabilized in silica fume on the strength of structural lightweight concretes. *Theory and practice of improving the efficiency of building materials : proceedings of the XIX International Scientific and Technical Conference of Young Scientists dedicated to the memory of Professor V.I. Kalashnikov*. 2024; 146-153. EDN RUHYMN. (rus.).

18. Chin C.O., Yang X., Paul S.C., Susilawati, Wong L.S., Kong S.Y. Development of thermal energy storage lightweight concrete using paraffin-oil palm kernel shell-activated carbon composite. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 261:121227. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121227. EDN BARLQM

19. Zhang Y., Aslani F. Development of fibre reinforced engineered cementitious composite using polyvinyl alcohol fibre and activated carbon powder for 3D concrete printing. *Construction and Building Materials*. 2021; 303:124453. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124453. EDN QDSNSN.

20. Khadiran T., Zobir Hussein M., Zainal Z., Rusli R. Activated carbon derived from peat soil as a framework for the preparation of shape-stabilized phase change material. *Energy*. 2015; 82:468-478. DOI: 10.1016/j.energy.2015.01.057

21. Chen Z., Shan F., Cao L., Fang G. Synthesis and thermal properties of shape-stabilized lauric acid/activated carbon composites as phase change materials for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2012; 102:131-136. DOI: 10.1016/j.solmat.2012.03.013

22. Hekimoğlu G., Sarı A., Gencel O., Önal Y., Ustaoglu A., Erdogmus E. et al. Thermal energy storage performance evaluation of bio-based phase change material/apricot kernel shell derived activated carbon in lightweight mortar. *Journal of Energy Storage*. 2023; 73:109122. DOI: 10.1016/j.est.2023.109122. EDN EJVXBF.
23. Zheng Ch., Huang Z., Wang D., Ju Z., Zhang Z., Zhang H. et al. Synthesis and properties of biomass derived carbon/PEG composite as photothermal conversion effective phase change material for functional concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2024; 149:105495. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105495. EDN UKVHDQ.
24. Qu Yu., Chen J., Liu L., Xu T., Wu H., Zhou X. Study on properties of phase change foam concrete block mixed with paraffin / fumed silica composite phase change material. *Renewable Energy*. 2020; 150:1127-1135. DOI: 10.1016/j.renene.2019.10.073. EDN YOCNUZ.
25. Kiran V.K., Sathyan D. Unveiling the combined influence of higher molecular weight polyethylene glycol and superplasticizer chemistry on fresh, mechanical, and microstructural performance of internally cured mortar. *Materials Research Express*. 2024; 11(7):075502. DOI: 10.1088/2053-1591/ad5c30. EDN EMBEYY.
26. Tan Sh., Zhang X. Progress of research on phase change energy storage materials in their thermal conductivity. *Journal of Energy Storage*. 2023; 61:106772. DOI: 10.1016/j.est.2023.106772. EDN KHHCF0.
27. Makendran C. Study on self-curing concrete using Polyethylene Glycol 600 for highway infrastructure project. *Materials Today: Proceedings*. 2023; 80:1677-1682. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.02.316. EDN JKCVP E.
28. Etman H.M., Elshikh M.M.Y., Kaloop M.R., Hu J.W., Abd ELMohsen I. Examination of the physical-mechanical properties of sustainable self-curing concrete using crushed ceramic, volcanic powder, and polyethylene glycol. *Sustainability*. 2024; 16(11):4659. DOI: 10.3390/su16114659. EDN YQOEAO.
29. Gowdra Virupakshappa S., Shrishail Basappa A., Thimmarayappa M., Narayana Ch.K.N., Buradi A., Emma A.F. Modelling and analysis of strength and durability properties of internal curing concrete using PEG 400 and artificial neural network. *Discover Sustainability*. 2024; 5(1):80. DOI: 10.1007/s43621-024-00240-3. EDN GCNJUW.

Received October 11, 2025.

Adopted in revised form on February 18, 2026.

Approved for publication on February 18, 2026.

B I O N O T E S: Sofia R. Sokolnikova — postgraduate student, Institute of Industrial and Civil Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8761-0875, Scopus: 57222431488, ORCID: 0000-0002-0896-4512; rsokolnikova@mail.ru;

Aleksandr S. Inozemtcev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Materials Science, Institute of Industrial and Civil Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2444-1204, Scopus: 55889834500, ORCID: 0000-0001-7807-688X; inozemcevas@mgsu.ru.

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

Совместимость модификаторов вязкости и гидрофобизаторов при обеспечении адгезии бетона для 3D-печати

Оксана Александровна Ларсен, Илья Омарович Раббаа

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В технологии строительной 3D-печати при больших объемах бетонирования требуется обеспечение технологических перерывов и разделение объекта на захватки, при этом растворная смесь должна успевать обрести несущую способность материала в ходе наращивания высоты вертикальных элементов. Из-за особенности ведения работ с применением этой технологии строительства возникают проблемы образования «холодных» швов, связанные с обеспечением прочности сцепления граничащих слоев при одновременном обеспечении регулирования требуемых реологических и технологических показателей материалов для 3D-печати. Рассмотрены основные направления исследования модификаторов реологических свойств растворной смеси, применяемых на строительном рынке, а также способы повышения межслойной адгезии мелкозернистых бетонов для аддитивного строительного производства (АСП). Активные минеральные добавки используются для регулирования реологических свойств растворной смеси. Органические добавки могут повышать прочность сцепления и адгезию, но требуют совместимости с другими группами добавок. Для этого необходимо изучение влияния органической модифицирующей добавки и гидрофобизатора на адгезионную прочность с бетонным основанием.

Материалы и методы. Приготовление растворной смеси и водного раствора органической полифункциональной добавки проводилось по установленному режиму с учетом полного диспергирования модифицирующего компонента в воде при последующем изготовлении и хранении образцов испытаний в соответствии с методикой, регламентированной нормативными документами.

Результаты. Результаты испытания показывают снижение адгезии материала к бетону при добавлении модификатора вязкости при совместном использовании с гидрофобизатором, поскольку при взаимодействии на границе раздела растворной смеси с бетоном не обеспечивается протекание процессов образования физико-химической связи. Также при введении гидрофобного компонента в состав растворной смеси наблюдается пластифицирующее действие с увеличением проникающей способности во внутренние слои бетона, на что указывает изменение преимущественно когезионного характера разрушения образцов на адгезионный с появлением участков с видом отрыва по материалу основания.

Выводы. Обоснована и подтверждена важность обеспечения совместимости органического модификатора и гидрофобизатора для обеспечения адгезионной прочности материала в АСП. Актуальность темы дальнейшей работы заключается в установлении рационального соотношения гидрофобизатора и органической добавки для обеспечения высоких значений адгезионной прочности и проникающей способности растворной смеси.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, материалы для АСП, аддитивные технологии, органическая полифункциональная добавка, гидрофобизатор, прочность сцепления с основанием, композиционное гипсовое вяжущее, межслойная адгезия

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ларсен О.А., Раббаа И.О. Совместимость модификаторов вязкости и гидрофобизаторов при обеспечении адгезии бетона для 3D-печати // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 4. С. 592–603. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.592-603

Автор, ответственный за переписку: Илья Омарович Раббаа, ilya_rabbaa@mail.ru.

Compatibility of viscosity modifiers and hydrophobic agents in ensuring concrete adhesion for 3D printing

Oksana A. Larsen, Ilya O. Rabbaa

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

ABSTRACT

Introduction. In 3D construction printing, where large volumes of concrete are involved, it is necessary to allow for construction breaks and to divide the structure into sections; at the same time, the concrete mix must have time to develop its load-bearing capacity as the vertical elements are built up. The peculiarity of conducting work using this construction technology results in problems of forming “cold” joints associated with ensuring the strength of the adhesion of adjacent layers while simultaneously regulating the required rheological and technological parameters of materials for 3D printing. Most studies

concern the operation of cement systems in comparison with gypsum systems due to the difficulties in regulating the setting time and water resistance of the stone. The main directions of research on viscosity modifier agents of mortar mixtures used in the construction market, as well as ways to increase the interlayer adhesion of fine-grained concretes for additive construction production, were considered. Active mineral additives are used to regulate the rheological properties of the mortar mixture. Organic additives can increase the strength of adhesion and adhesion, but require compatibility with other groups of additives. This requires studying the effect of an organic modifying additive and a hydrophobic agent on the adhesive strength with a concrete base.

Materials and methods. The preparation of the solution mixture and the aqueous solution of the organic polyfunctional additive was carried out according to the established mode, taking into account the complete dispersion of the modifying component in water during the subsequent production and storage of test specimens in accordance with the methodology regulated by regulatory documents.

Results. The test results indicate a decrease in the adhesion of the material to concrete when adding a viscosity modifier when used together with a hydrophobic agent, since the interaction at the interface of the mortar mixture with concrete does not ensure the formation of a physical and chemical bond. Also, when introducing a hydrophobic component into the composition of the mortar mixture, a plasticizing effect is observed with an increase in penetrating ability into the inner layers of concrete, which is indicated by changes in the predominantly cohesive nature of the destruction of specimens to adhesive with the appearance of areas with a type of tearing along the base material.

Conclusions. The relevance of ensuring the compatibility of an organic modifier and a hydrophobic agent to ensure the adhesive strength of the material in additive construction production is substantiated and confirmed. The relevance of the topic of further work lies in establishing a rational ratio of a hydrophobic agent and an organic additive to ensure high values of adhesive strength and penetrating ability of the mortar mixture.

KEYWORDS: construction, materials for AC, additive technologies, organic multifunctional additive, hydrophobic agent, adhesion strength to the base, composite gypsum binder, interlayer adhesion

FOR CITATION: Larsen O.A., Rabbaa I.O. Compatibility of viscosity modifiers and hydrophobic agents in ensuring concrete adhesion for 3D printing. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(4):592-603. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.592-603 (rus.).

Corresponding author: Ilya O. Rabbaa, ilya_rabbaa@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Технология возведения строительных объектов с применением строительной трехмерной печати подразумевает наличие технологических перерывов в работе оборудования и разделение объекта на технологические захватки. По прошествии времени нанесенная растворная смесь успевает приобрести кристаллизационную структуру с набором прочности для обеспечения несущей способности материала [1, 2], на который начинают оказывать воздействие нарастающие слои укладки, после чего затвердевший цементный камень (ЦК) следует рассматривать в качестве основания под нанесение материала для аддитивного строительного производства (АСП), поскольку возникает риск появления холодных швов [3, 4].

Используемые на строительном рынке материалы для АСП отличают не решенные вопросы в обеспечении прочности сцепления затвердевшего цементного камня граничащих слоев в связи с технологическими принципами при экструдировании растворной смеси через сопло 3D-принтера, а также адгезии к поверхности нанесения, выражаемые бесшовным переходом при увеличении уровня возведения вертикальной конструкции, в результате чего требуется проведение мероприятий по обеспечению однородности характеристик сцепления материала строительного объекта для соответствия принципам монолитности. Озвученная проблема затрагивается в научных публикациях [5, 6], для ее решения предлагается регулировка рецептуры состава для строительной 3D-печати путем обеспечения сохранения технологических показателей во времени при одновременном придании на-

несенному материалу несущей способности при использовании активных минеральных добавок (МД) в качестве модификаторов реологических свойств растворной смеси.

В большинстве исследовательских работ по изучению реологических и технологических показателей материалов для строительной 3D-печати рассматриваются смеси, приготовленные на цементном вяжущем, по сравнению с гипсовым и его композитными аналогами [7], поскольку подобный выбор сырья обусловлен простотой обеспечения сохранности технологических свойств растворной смеси в соответствии с установленным режимом и требуемой скоростью возведения, а также отсутствием возможности получения композиционного вяжущего с высокими техническими и эксплуатационными характеристиками с применением вяжущего низкой марки. К наиболее значимым проблемам применения гипсового сырья при разработке рецептуры материала для АСП относится обеспечение легкости регулирования сроков схватывания и стойкости к воздействию воды гипсового камня, выражаемое коэффициентом его размягчения.

Влияние добавок для бетонов и строительных растворов, позволяющих регулировать реологические свойства и технологические показатели растворной смеси состава для строительной 3D-печати, рассматривалось во многих отечественных и зарубежных трудах. Изготовлена мелкозернистая бетонная смесь для 3D-печати с помощью гипсоцементно-пуццоланового вяжущего и проанализированы полученные технологические показатели при регулировании содержания МД и крупности заполни-

теля [8]. Эти результаты свидетельствуют об эффективности применения метакаолина и активированного метакаолина на основании достижения высоких показателей при минимальном содержании в составе затвердевшего камня. Однако следует выделить высокий расход исследуемых компонентов, составляющих пятую часть от массы вяжущего, что приводит к удорожанию мелкозернистого бетона на единицу площади.

Приводится решение вопроса образования «холодных» швов в теле напечатанного мелкозернистого бетона при длительных технологических перерывах с использованием переходного слоя в составе с полифункциональной добавкой, изучаются ее состав и влияние на прочность сцепления основного и переходного слоев при длительных технологических перерывах в работе оборудования [9]. Автором было установлено влияние устройства переходного слоя на мелкозернистой бетонной смеси на снижение прочности сцепления слоев с увеличением времени технологического перерыва при использовании переходного слоя в технологии 3D-печати. Интенсивность снижения адгезионной прочности граничащих слоев при устройстве переходного слоя с увеличением продолжительности технологического перерыва и, как следствие, времени структурообразования и набора прочности цементным камнем в несколько раз меньше по сравнению с образцами, полученными без устройства переходного слоя. Подобное технологическое решение позволяет регулировать процесс экструзии материала в широком временном интервале с возможностью составления гибкого графика возведения объектов при сохранении высокого качества готовой продукции.

Проведен исследовательский анализ по оценке реологических свойств широкого перечня добавок-модификаторов различного происхождения с целью модифицирования цементной системы с использованием кварцевого заполнителя и изучен процесс гидратации с нарастания структурной прочности при их применении методом сдавливающей реометрии и микроструктурного анализа [10]. Данные результаты отражают наибольшую сочетаемость цементной системы на кварцевом песке при совместном применении метакаолина и модифицированной наноразмерной добавки комплексного назначения для обеспечения удовлетворительных показателей структурной прочности дисперсной системы, выраженной формоустойчивостью, при обеспечении ее пластичности и оптимальной скорости структурообразования ЦК при высоких показателях прочности на сжатие в проектном возрасте.

Рассмотрено использование органических добавок для модификации реологических свойств цементного теста в технологии сухих строительных смесей путем изучения технологических показателей и процесса гидратации составов с применением эфира целлюлозы и эфира крахмала, а также

их взаимного сочетания при регулировании соотношения добавок в составе цементной системы [11]. Общие результаты тестирования указывают на то, что эфир целлюлозы обладает наибольшим воздействием на увеличение связности растворной смеси, объема вовлеченного воздуха и водоудерживающей способности по сравнению с эфиром крахмала. Однако составы с преобладающим количеством эфира крахмала влияли на процесс гидратации и структурообразования ЦК в большей степени при заметном увеличении сроков схватывания и затвердевания по сравнению с эфиром целлюлозы. Оказываемый эффект полимерных добавок на свойства цементного теста усиливался с ростом содержания используемого органического модификатора в составе растворной смеси.

Изучено влияние органических модификаторов на основе стиролакриловой дисперсии, этиленвинилацетата, сополимера винилацетата и акрила и других добавок, представленных в порошкообразном и эмульсионном виде, содержащихся в цементных растворах для обмазочной гидроизоляции на водонепроницаемость и прочность сцепления с бетонным основанием [12]. В процессе анализа микроструктуры затвердевшего материала, показателей адгезионной прочности и количества поглощенной воды определено, что величина этих показателей во многом зависит от способности добавок к диспергированию в объеме свежего раствора, исходя из чего увеличение содержания труднорастворимого компонента приводит к замедлению его распределения в системе до момента набора прочности, что вызывает рост внутренних дефектов ЦК, при этом в ходе изменения содержания вяжущего в составе смеси не было установлено значительного влияния на величину технологических показателей строительного раствора. Наибольшую эффективность по увеличению водонепроницаемости строительного раствора показал модификатор на основе этиленвинилацетата, так как он подвергается быстрому диспергированию в растворной смеси, образуя однородное тесто с равномерно распределенными гидратами и более мелкими заполнителями с компактной упаковкой частиц заполнителя в затвердевшем растворе. В ходе сравнения модифицирующих добавок, вводимых в цементно-песчаное тесто в порошкообразном или жидком виде, не выявлено значительного влияния на изменение показателей адгезионной прочности и однородности системы ЦК, вследствие чего порошкообразные добавки-модификаторы, представленные в исследовательской работе, имеют достаточную скорость диспергирования для их конкурентоспособности с эмульсионными аналогами.

При обобщении основных направлений исследования повышения адгезионной прочности мелкозернистого бетона для АСП на границе затвердевшего и свеженаносимого слоя при изуче-

нии влияния органического модификатора вязкости и гидрофобизатора в порошкообразном виде следует руководствоваться порядком их введения в состав растворной смеси, режимом ее приготовления для обеспечения однородного распределения компонентов, химическим взаимодействием органических компонентов с дисперсной системой и между собой, а также их оптимальным расходом для обеспечения заданных реологических свойств и технологических показателей.

Поэтому для получения требуемых показателей материалов на многокомпонентном гипсовом вяжущем для аддитивных строительных технологий предлагается использование активных минеральных добавок, участвующих в регулировании реологических и технологических свойств растворной смеси и обеспечивающих гидравлическую активность применяемого вяжущего [13]. В некоторых научных трудах авторов, посвященных изучению реологических свойств растворной смеси с применением МД, показано, что их эффективность действия в качестве модификаторов вязкости системы возможна при значительных расходах по массе вяжущего [14–16]. По этой причине в качестве эффективных добавок, модифицирующих реологические свойства растворной смеси, используют материалы органического происхождения, которые также могут повышать прочность сцепления граничащих слоев материала и к основанию нанесения, однако при этом необходимо руководствоваться их совместимостью с другими применяемыми добавками в составе смеси, поскольку при препятствии действию одного из компонентов механизму работы другого снижается эффективность работы состава, затрудняя при этом подбор рецептуры [17–19].

Цель исследования — изучение влияния органической модифицирующей добавки полифункционального назначения на адгезионную прочность с бетонным основанием. Кроме того, важно учитывать его совместимость с гидрофобизаторами при подборе оптимального соотношения в составе на композиционном гипсовом вяжущем для повышения водостойкости затвердевшего камня, поскольку несоблюдение этого условия может вызвать уменьшение эффекта отталкивания и привести к увеличению водопоглощения материала, а также снижению адгезионной прочности материала за счет нейтрализации действия макромолекул модификатора по образованию полимерной связи с основанием нанесения и других эксплуатационных характеристик [20, 21].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходного сырья, удовлетворяющего требованию нормативного документа на материалы для АСП, использованы следующие компоненты:

1) гипсовое вяжущее высокопрочное марки Г-16 Б II ЗАО «Самарский гипсовый комбинат» в соответствии с ГОСТ 125–2018;

2) гипсовое вяжущее строительное марки Г-5 Б II ЗАО «Самарский гипсовый комбинат» в соответствии с ГОСТ 125–2018;

3) портландцемент ЦЕМ I 42,5Н АО «Белгородский цемент» в соответствии с ГОСТ 31108–2020;

4) зола-уноса ООО «ЭКО-Золопродукт» в соответствии с ТУ 5712-003-84800065–2010;

5) мелкий пористый заполнитель, полученный из отсева дробления некондиционной фракции пеностеклянного щебня фракции с размером зерен 0,63–0,16 мм;

6) порошкообразный суперпластификатор Sika ViscoCrete-226 P на основе эфиров поликарбоксилатов;

7) гидрофобизирующая добавка: порошок олеат натрия с содержанием вещества не менее 95 %;

8) органическая полифункциональная добавка, выполняющая функцию модификатора вязкости с внутренним шифром VM-XG;

9) водопроводная вода питьевая в соответствии с ГОСТ 23732–2011.

Расходы компонентов для получения материала исследования были приняты на основании ранее разработанного состава, применяемого при изучении реологических свойств и технологических показателей растворной смеси с модифицирующим компонентом. Количество гидрофобизатора для приготовления материала исследования было принято 0,3 % от массы сухой смеси.

Затворение сухой смеси осуществлялось с помощью 8%-ного водного раствора органической полифункциональной добавки. С целью обеспечения полного протекания процесса диспергирования модифицирующего компонента в объеме жидкой фазы проводилось периодическое перемешивание набухающего модификатора с помощью дрели с лопастной насадкой с частотой вращения не более 450 об/мин. Для устранения влияния непрогидратировавших частиц органической полифункциональной добавки на образование дефектов в затвердевшем гипсовом камне использование приготовленного геля в качестве затворителя сухой смеси при приготовлении раствора проводилось не ранее чем через 90 мин от начала приготовления раствора модификатора вязкости.

При приготовлении растворной смеси водотвердое отношение (В/Т) составляло 0,3, из которых 0,15 — вода затворения, оставшаяся часть — приготовленный 8%-ный раствор модификатора вязкости. Для приготовления растворной смеси в течение первых 60 с осуществлялось перемешивание сухой смеси с водой затворения. Далее смеситель останавливался и на протяжении последующих 15 с в чашу с затворенной смесью добавлялся приготовленный раствор модификатора, после чего производился запуск смесителя для перемешивания в течение минуты. По прошествии 120 с от общего времени смеситель останавливался на 90 с для снятия налипшей растворной смеси на лопасть и смесительную чашу.

По истечении времени осуществлялся третий запуск смесителя для финального перемешивания в течение 60 с. Общее время приготовления растворной смеси обоих составов составляло не более 3 мин.

С целью определения подвижности растворной смеси применялись метод расплыва кольца и расплыва конуса согласно ГОСТ Р 58277–2018, использовались металлическое кольцо диаметром 70 мм и усеченный конус с диаметром основания 100 мм совместно со встряхивающим столиком соответственно. Растворная смесь заполнялась в два приема с штыкованием каждого слоя при помощи шпателя с шириной лезвия 10 мм. Расплыв конуса проводился после 15 ударов на встряхивающем столике через 30 с. Диаметр расплыва растворной смеси, оцениваемый с помощью кольца, определялся через 60 с от момента его снятия.

Прочность сцепления раствора с бетонным основанием устанавливалась по методике ГОСТ Р 58276–2018. Приготовленная растворная смесь наносилась на поверхность бетонной плиты-основания шпателем с шириной лезвия 10 мм в один прием с прижатием смеси и выравниванием лицевой поверхности образцов стальной линейкой. Для изготовления образцов длиной ребра 50 мм использовался силиконовый аппликатор, обеспечивающий толщину нанесения слоя растворной смеси 5 мм. Снятие аппликатора с плиты основания осуществлялось при сохранении свойств растворной смеси, при этом предварительно проводилось подрезание внешней грани вдоль отверстий аппликатора с помощью лезвия для предотвращения возможности нарушения целостности изготовленных образцов.

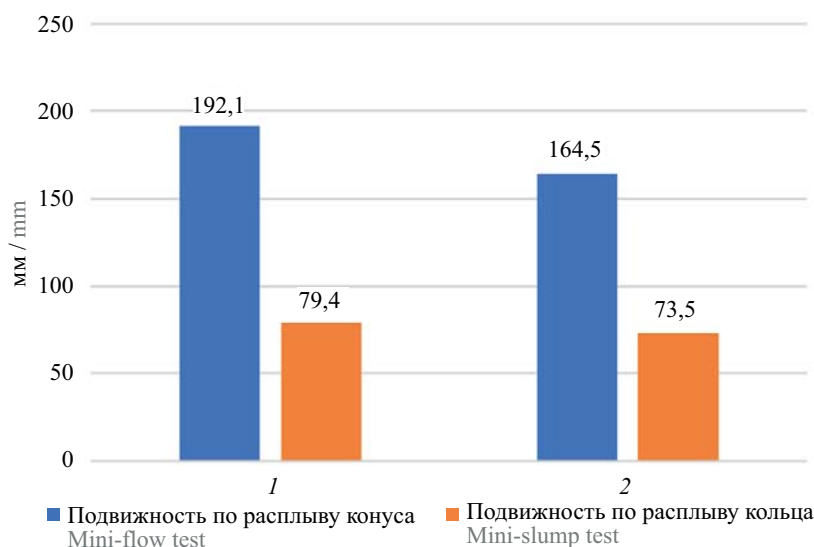
Плита-основание с образцами испытания хранилась в течение 7 сут в помещении, обеспечивающем поддержание температуры и относительной влажности воздуха $t = (22 \pm 2) ^\circ\text{C}$ и $\phi = (52 \pm 10) \%$ соответственно. По прошествии времени хранения плиты к затвердевшим образцам приклеивались стальные штампы квадратного сечения с размером граней 50 мм

двухкомпонентным клеем на основе эпоксидной смолы. Перед наклеиванием штампов проводилось выравнивание поверхности материала испытания путем затирки образцов с помощью шлифовальной бумаги с последующим обеспыливанием поверхности. Испытание на адгезионный отрыв образцов от бетонной плиты осуществлялось через 24 ч после приклеивания штампов с применением портативной испытательной машины для измерения усилия отрыва (адгезии) с использованием гидравлического силового цилиндра с максимальным измеряемым усилием отрыва 9 кН при скорости нарастания нагрузки $250 \pm 50 \text{ Н/с}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате исследования технологических показателей мелкозернистого бетона для АСП с применением органической полифункциональной добавки установлено ее влияние на подвижность растворной смеси и ее прочность сцепления с бетонным основанием при совместном использовании с гидрофобизирующей добавкой.

Полученные результаты оценки показателей подвижности разных методов свидетельствуют об увеличении связности структуры растворной смеси при наличии натриевых солей, на что указывает снижение подвижности по расплыву конуса на 14,4 % и расплыву кольца на 7,4 %. При предварительном добавлении гидрофобного компонента в состав сухой смеси при затворении происходит адсорбирование молекул на частицах с образованием боковых звеньев, обеспечивающих их стерическое отталкивание, вследствие чего подвижность растворной смеси увеличивается. При этом с повышением содержания добавки также возрастает и число звеньев. В итоге система становится более структурированной с связной, а ее удобоукладываемость начинает снижаться, что подтверждается полученными результатами определения подвижности (рис. 1, а).



а

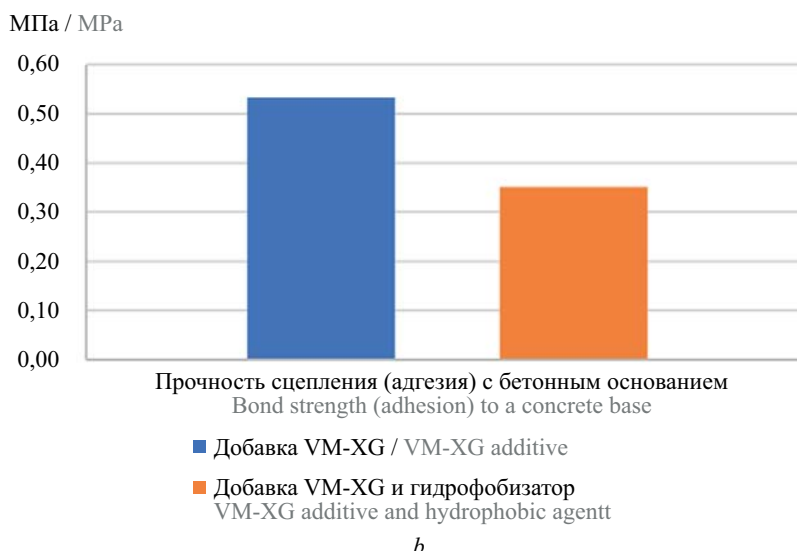


Рис. 1. Влияние органической полифункциональной добавки и гидрофобизатора: *a* — на подвижность растворной смеси для 3D-печати; *b* — на адгезию материала для 3D-печати

Fig. 1. The effect of an organic multifunctional additive and a hydrophobic agent: *a* — on the mobility of a mortar for 3D printing; *b* — on the adhesion of the material for 3D-printing

Полученные значения прочности сцепления серии образцов свидетельствуют о снижении адгезии материала к бетонному основанию с 0,53 до 0,35 МПа при добавлении гидрофобизирующей добавки совместно с модификатором в состав сухой смеси (рис. 1, *b*). Подобное проявление подтверждается механизмом действия гидрофобных компонентов, механизм действия которых заключается в протекании химических процессов на границе раздела поверхности затвердевающего раствора и основания, а также внутри микродефектов бетона с образованием пленок олеата кальция, образующихся в ходе ионообменной реакции и препятствующих дальнейшему капиллярному подсосу воды из растворной смеси, который необходим для образования физико-химической связи с бетоном [22, 23].

При визуальной оценке характера отрыва (рис. 2) было установлено, что образцы состава затвердевшего камня в процессе применения органической полифункциональной добавки обеспечивают 55,2 % когезионного разрушения и 44,8 % адгезионного разрушения в серии образцов испытания. В то же время серия образцов, изготовленных при совместном применении модифицирующего компонента и гидрофобизатора, обладает долей поверхности испытанного раствора с разрушением материала основания 25,3 %.

При использовании органического модификатора вязкости в растворе обеспечивается получение однородной структуры раствора без ослабления адсорбционных сил к поверхности бетона. В результате получения однородного по структуре затвердевшего камня и удовлетворительного физико-химического взаимодействия на границах материала, превышающего адгезионную прочность частиц системы ввиду

особенностей применяемого вяжущего, обеспечивается разрушение по растворной смеси (рис. 3).

При введении гидрофобного компонента можно наблюдать ослабление физико-химических связей частиц мелкозернистого бетона на участке раздела двух материалов, результатом которого служит преобладание прочной связи внутри затвердевшего материала со слабой адгезией к бетону (рис. 4).

Продemonстрированное изменение характера отрыва от бетонной поверхности при содержании гидрофобизатора в растворной смеси может быть объяснено тем, что с повышением содержания натриевых солей в составе дисперсной системы при их адсорбировании на частицах вяжущего происходит их стерическое отталкивание с увеличением пластифицирующего действия и проникающей способности растворной смеси с заполнением микродефектов и капиллярных пор бетонного основания [24]. Также предварительное обеспыливание поверхности бетонного основания путем увлажнения плиты при очистке от пылевидных частиц привело к ухудшению образования химических связей на границе раздела основания и частиц раствора с адсорбированными гидрофобными молекулами, в результате чего возникает десорбция.

На основании изложенных вариантов причин снижения прочности сцепления растворной смеси с бетонным основанием при использовании гидрофобного компонента следует, что адгезия материала к плите обеспечивается за счет физико-механического взаимодействия, обусловленного развитостью поверхности основания и дефектами его микроструктуры, не оказывая при этом увеличения технологических показателей растворной смеси при ее структурировании.



a



b



c

Рис. 2. Внешний вид образцов для определения прочности сцепления (адгезии) материала для АСП с бетонным основанием: *a* — перед приклеиванием штампов; *b* — после отрыва серии образцов с органической модифицирующей добавкой; *c* — после отрыва серии образцов с органической модифицирующей добавкой и гидрофобизатором

Fig. 2. Appearance of specimens for determining the adhesion strength of the AC material to the concrete base: *a* — before bonding the stamps; *b* — after peeling off a series of specimens with an organic modifying additive; *c* — after peeling off a series of specimens with an organic modifying additive and a hydrophobic agent



a



b



c

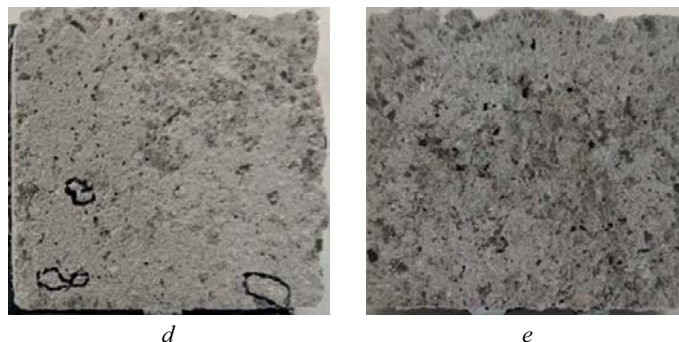


Рис. 3. Визуальная оценка характера отрыва серии образцов состава с органической полифункциональной добавкой от бетонного основания при определении адгезии мелкозернистого бетона для аддитивного строительного производства с бетонным основанием

Fig. 3. Visual assessment of the nature of separation of a series of specimens of a composition with an organic multifunctional additive from a concrete base when determining the adhesion of fine-grained concrete for additive construction with a concrete base

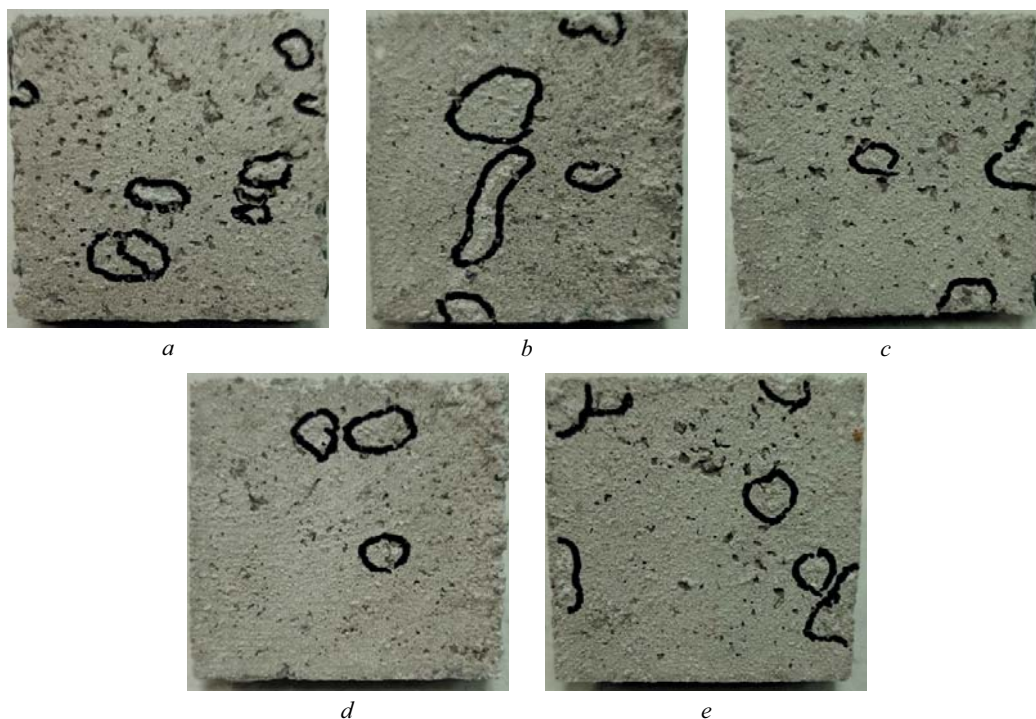


Рис. 4. Визуальная оценка характера отрыва серии образцов состава с органической полифункциональной добавкой и гидрофобизатором от бетонного основания при определении адгезии мелкозернистого бетона для аддитивного строительного производства с бетонным основанием

Fig. 4. Visual assessment of the nature of separation of a series of specimens of a composition with an organic multifunctional additive and a hydrophobic agent from a concrete base when determining the adhesion of fine-grained concrete for additive construction to a concrete base

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе анализа влияния совместного применения органического модификатора вязкости и гидрофобизатора на прочность сцепления затвердевшего раствора с бетонным основанием по полученным результатам были сделаны следующие выводы:

1. Обоснована возможность совместного использования органического модификатора реологических

свойств и гидрофобизатора для обеспечения адгезионной прочности растворной смеси для 3D-печати на композиционном гипсовом вяжущем с оптимальным соотношением компонентов для обеспечения межслойной адгезии.

2. Установлено влияние совместной работы гидрофобизирующей добавки и органического модификатора вязкости на технологические свойства растворной смеси. При введении натриевых солей в состав

мелкозернистой бетонной смеси с применением органической полифункциональной добавки происходит увеличение связности системы при снижении подвижности по расплыву конуса при встряхивании, а также повышение структурной прочности системы на основании результатов подвижности по расплыву кольца при свободном оседании.

3. Определено, что введение гидрофобизатора совместно с модифицирующей добавкой способствует снижению адгезионной прочности к бетону. Применение объемной гидрофобизации приводит к снижению прочности сцепления на 34,2 %. Изучение характера отрыва затвердевшего раствора к бетонному основанию свидетельствует об увеличении проникающей способности растворной смеси, что объ-

ясняется положительным влиянием гидрофобизатора на улучшение консистенции растворной смеси, обеспечение ее связности с системой.

В ходе будущих исследовательских работ, посвященных изучению сочетаемости органического модификатора вязкости с гидрофобными добавками, необходимо подобрать минимальное содержание солей натрия в растворной смеси, не препятствующих образованию физико-химических связей с затвердевшим основанием при обеспечении водостойкости композитного камня и связности растворной смеси. Также требуется проведение анализа микроструктуры мелкозернистого бетона на границе сцепления с основанием нанесения и в его теле в присутствии гидрофобизатора при затворении смеси.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Иноземцев А.С.* Современная теория и практика технологии бетонов для 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 2. С. 216–245. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.216-245. EDN PYHOAX.

2. *Malaeb Z., Hachem H., Tourbah A., Maalouf T., El Zarwi N., Hamzeh F.* 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2015. Vol. 6. Issue 4. Pp. 14–22.

3. *Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D.* Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 143. Pp. 172–196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012. EDN YEXMXZ.

4. *Гончарова Ю.Ю., Дроботов А.В., Торубаров И.С., Волохов М.А.* Исследование адгезионных свойств поверхностей для 3D-печати // Cifra. Машиностроение. 2024. № 2 (3). DOI: 10.60797/ENGIN.2024.3.3. EDN VQTFWM.

5. *Толстой А.Д., Лесовик В.С., Новиков К.Ю.* Высокопрочные бетоны на композиционных вяжущих с применением техногенного сырья // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. № 2 (17). С. 174–180. EDN WHAIQB.

6. *Mechtcherine V., Grafe J., Nerella V.N., Spaniol E., Hertel M., Füssel U.* 3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction — Manufacture, mechanical properties and bond behaviour // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 179. Pp. 125–137. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.202

7. *Potapova E., Guseva T., Shchelchikov K., Fischer H.B.* Mortar for 3D Printing Based on Gypsum Binders // Materials Science Forum. 2021. Vol. 1037. Pp. 26–31. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1037.26. EDN HWAQRJ.

8. *Рахимов Р.З., Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Зиганишина Л.В.* Гипсоцементно-пуц-

цолановые бетоны для аддитивного строительного производства // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 4. С. 580–595. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.580-595. EDN DZSMZH.

9. *Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Зиганишина Л.В.* Совершенствование аддитивного строительного производства повышением адгезии слоев при длительных перерывах в процессе 3D-печати // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 1 (67). С. 127–134. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.13. EDN ULXEQB.

10. *Славчева Г.С., Артамонова О.В., Бабенко Д.С., Шведова М.А.* Исследование влияния модифицирующих добавок на структурообразование и твердение цементных композитов для 3D-печати // Конденсированные среды и межфазные границы. 2023. Т. 25. № 1. С. 112–124. DOI: 10.17308/kcmf.2023.25/10979. EDN XDOJLP.

11. *Spychal E., Stepień P.* Effect of Cellulose Ether and Starch Ether on Hydration of Cement Processes and Fresh-State Properties of Cement Mortars // Materials. 2022. Vol. 15. Issue 24. P. 8764. DOI: 10.3390/ma1524-8764. EDN LNHVQQ.

12. *Brachaczek W., Chleboś A., Giergiczny Z.* Influence of Polymer Modifiers on Selected Properties and Microstructure of Cement Waterproofing Mortars // Materials. 2021. Vol. 14. Issue 24. DOI: 10.3390/ma14-247558. EDN SEAEXN.

13. *Сулейманова Л.А., Малюкова М.В., Слепухин А.С., Крушельницкая Е.А., Толстой А.Д.* Влияние модифицирующей добавки с гидрофобизирующим эффектом на повышение эксплуатационных характеристик вибропрессованных изделий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 8–13. DOI: 10.34031/article_5da44154d5e735.90950690. EDN SHYITR.

14. Сураев В.А. Гидрофобизация. Теория и практика // Технологии строительства. 2002. № 1 (17). С. 120–121.

15. Славчева Г.С., Артамонова О.В. Управление реологическим поведением смесей для строительной 3D-печати: экспериментальная оценка возможностей арсенала «нано» // Нанотехнологии в строительстве. 2019. Т. 11. № 3. С. 325–334. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-3-325-334. EDN NNOLZG.

16. Poluektova V.A., Shapovalov N.A. Concrete chemicalization for digital printing: control of rheology and structure formation // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. Pp. 59–65. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6_9. EDN NGGKBO.

17. Славчева Г.С., Шведова М.А., Бабенко Д.С. Анализ и критериальная оценка реологического поведения смесей для строительной 3D-печати // Строительные материалы. 2018. № 12. С. 34–40. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-766-12-34-40. EDN YROONV.

18. Славчева Г.С., Артамонова О.В., Котова К.С., Шведова М.А., Юров П.Ю. Исследования факторов регулирования прочности адгезионного соединения «цементная матрица – армирующее волокно» в композитах для строительной 3D-печати // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15. № 2. С. 124–133. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-2-124-133. EDN BMRGWY.

19. Wang Ya., Qiu L.Ch., Chen S.G., Liu Yi. 3D concrete printing in air and under water: a comparative study on the buildability and interlayer adhesion //

Construction and Building Materials. 2024. Vol. 411. P. 134403. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134403. EDN XGYFDI.

20. Строганов В.Ф., Амелеченко М.О., Мухаметрахимов Р.Х., Вдовин Е.А., Табаева Р.К. Повышение уровня адгезии стирол-акриловых покрытий, модифицированных наполнителем — шунгитом при защите строительных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2021. № 9. С. 29–32. DOI: 10.31044/1813-7008-2021-0-9-29-32. EDN SZNZHL.

21. Tao Y., Yuan Y., Vantighem G., Van Tittelboom K. Adhesion Properties of Printable Polymer-Modified Concrete for Rock Tunnel Linings // ACI Materials Journal. 2021. Vol. 118. Issue 6. DOI: 10.14359/51733105

22. Yu M., Li P., Feng Y., Li Q., Sun W., Quan M. et al. Positive effect of polymeric silane-based water repellent agents on the durability of superhydrophobic fabrics // Applied Surface Science. 2018. Vol. 450. Pp. 492–501. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.04.204

23. Bilyukevich A.V., Plisko T.V., Usosky V.V., Ovcharova A.A., Volkov V.V. Hydrophobization of polysulfone hollow fiber membranes // Petroleum Chemistry. 2018. Vol. 58. Issue 4. Pp. 279–288. DOI: 10.1134/s0965544118040035. EDN SFRMPY.

24. Weger D., Baier D., Straßer A., Protting S., Kränkel T., Bachmann A. et al. Reinforced Particle-Bed Printing by Combination of the Selective Paste Intrusion Method with Wire and Arc Additive Manufacturing — A First Feasibility Study // RILEM Bookseries. 2020. Pp. 978–987. DOI: 10.1007/978-3-030-49916-7_95

Поступила в редакцию 15 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 21 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 16 февраля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Оксана Александровна Ларсен** — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 803516, Scopus: 57194441930, ResearcherID: S-7860-2017, ORCID: 0000-0002-9612-7190; LarsenOA@mgsu.ru;

Илья Омарович Раббаа — аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2276-8348, ORCID: 0009-0004-8493-9564; ilya_rabbaa@mail.

Вклад авторов:

Ларсен О.А. — научное руководство, концепция исследования, научное консультирование, доработка текста, итоговые выводы.

Раббаа И.О. — концепция исследования, сбор материала, изготовление образцов, проведение испытаний, обработка результатов, написание исходного текста, формулирование выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Inozemtcev A.S. Modern theory and practice of concrete technology for 3D printing in construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):216-245. DOI: 10.

22227/1997-0935.2024.2.216-245. EDN PYHOAX. (rus.).

2. Malaeb Z., Hachem H., Tourbah A., Maalouf T., El Zarwi N., Hamzeh F. 3D Concrete Printing: Machine

and Mix Design. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2015; 6(4):14-22.

3. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018; 143: 172-196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012. EDN YEXMXZ.

4. Goncharova J.Y., Drobotov A.V., Torubarov I.S., Volokhov M.A. A study of adhesion properties of surfaces for 3D-printing. *Cifra. Engineering*. 2024; 2(3). DOI: 10.60797/ENGIN.2024.3.3. EDN VQTFWM. (rus.).

5. Tolstoi A.D., Lesovik V.S., Novikov K.Iu. High endurance concretes on composite bindings with the use of man-made raw materials. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2016; 2(17):174-180. EDN WHAIQB. (rus.).

6. Mechtcherine V., Grafe J., Nerella V.N., Spaniol E., Hertel M., Füssel U. 3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction — Manufacture, mechanical properties and bond behaviour. *Construction and Building Materials*. 2018; 179:125-137. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.202

7. Potapova E., Guseva T., Shchelchikov K., Fischer H.B. Mortar for 3D Printing Based on Gypsum Binders. *Materials Science Forum*. 2021; 1037:26-31. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1037.26. EDN HWAQRJ.

8. Rakhimov R.Z., Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R., Ziganshina L.V. Gypsum-cement-puzzolanic concrete for additive construction production. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(4):580-595. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.580-595. EDN DZSMZH. (rus.).

9. Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R., Ziganshina L.V. Improving additive manufacturing for construction by increasing layer adhesion during long breaks in 3D printing. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2024; 1(67):127-134. DOI: 10.48612/NewsKSUA/67.13. EDN ULXEQB. (rus.).

10. Slavcheva G.S., Artamonova O.V., Babenko D.S., Shvedova M.A. Studying the effect of modifying additives on the hydration and hardening of cement composites for 3D printing. *Condensed Matter and Interphases*. 2023; 25(1):112-124. DOI: 10.17308/kcmf.2023.25/10979. EDN XDOJLP. (rus.).

11. Spychał E., Stępień P. Effect of Cellulose Ether and Starch Ether on Hydration of Cement Processes and Fresh-State Properties of Cement Mortars. *Materials*. 2022; 15(24):8764. DOI: 10.3390/ma15248764. EDN LNHVQQ.

12. Brachaczek W., Chleboś A., Giergiczny Z. Influence of Polymer Modifiers on Selected Properties and Microstructure of Cement Waterproofing Mortars. *Materials*. 2021; 14(24). DOI: 10.3390/ma14247558. EDN SEAEXN.

13. Suleymanova L., Malyukova M., Slepuhin A., Krushel'nickaya E., Tolstoy A. Influence of modifying

agent with hydrophobization effect on increase of operational characteristics of vibropressed products. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2019; 9:8-13. DOI: 10.34031/article_5da44154d5e735.90950690. EDN SHYITR. (rus.).

14. Suraev V.A. Hydrophobization. Theory and practice. *Technology of Building Construction*. 2002; 1(17):120-121. (rus.).

15. Slavcheva G.S., Artamonova O.V. The control of rheological behaviour for 3D-printable building mixtures: experimental evaluation of “nano” tools prospects. *Nanotechnologies in Construction*. 2019; 11(3):325-334. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-3-325-334. EDN NNOLZG. (rus.).

16. Poluektova V.A., Shapovalov N.A. Concrete chemicalization for digital printing: control of rheology and structure formation. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 95:59-65. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6_9. EDN NGGKBO.

17. Slavcheva G.S., Shvedova M.A., Babenko D.S. Analysis and criteria assessment of rheological behavior of mixes for construction 3D printing. *Construction Materials*. 2018; 12:34-40. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-766-12-34-40. EDN YROONV. (rus.).

18. Slavcheva G.S., Artamonova O.V., Kotova K.S., Shvedova M.A., Yurov P.Yu. Study of the strength regulation factors for the adhesive bonding “cement matrix – reinforcing fiber” in composites for 3D-build printing. *Nanotechnologies in Construction*. 2023; 15(2):124-133. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-2-124-133. EDN BMRGWY. (rus.).

19. Wang Ya., Qiu L.Ch., Chen S.G., Liu Yi. 3D concrete printing in air and under water: a comparative study on the buildability and interlayer adhesion. *Construction and Building Materials*. 2024; 411:134403. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134403. EDN XGYFDI.

20. Stroganov V.F., Amelchenko M.O., Mukhametrakhimov R.Kh., Vdovin E.A., Tabaeva R.K. Increase in adhesion degree of sterol-acrylic coatings, modified with schungite-filler, for protection of building materials. *Adhesives. Sealants. Technologies*. 2021; 9:29-32. DOI: 10.31044/1813-7008-2021-0-9-29-32. EDN SZNZHL. (rus.).

21. Tao Y., Yuan Y., Vantighem G., Van Tittelboom K. Adhesion Properties of Printable Polymer-Modified Concrete for Rock Tunnel Linings. *ACI Materials Journal*. 2021; 118(6). DOI: 10.14359/51733105

22. Yu M., Li P., Feng Y., Li Q., Sun W., Quan M. et al. Positive effect of polymeric silane-based water repellent agents on the durability of superhydrophobic fabrics. *Applied Surface Science*. 2018; 450:492-501. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.04.204

23. Bilyukevich A.V., Plisko T.V., Usosky V.V., Ovcharova A.A., Volkov V.V. Hydrophobization of polysulfone hollow fiber membranes. *Petroleum Chemistry*. 2018; 58(4):279-288. DOI: 10.1134/s0965544118040035. EDN SFRMPY.

24. Weger D., Baier D., Straßer A., Prottung S., Kränkel T., Bachmann A. et al. Reinforced Particle-Bed Printing by Combination of the Selective Paste Intrusion Method with Wire and Arc Additive Manufacturing — A First Feasibility Study. *RILEM Bookseries*. 2020; 978-987. DOI: 10.1007/978-3-030-49916-7_95

Received October 15, 2025.

Adopted in revised form on October 21, 2025.

Approved for publication on February 16, 2026.

B I O N O T E S: **Oksana A. Larsen** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Construction Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 803516, Scopus: 57194441930, ResearcherID: S-7860-2017, ORCID: 0000-0002-9612-7190; LarsenOA@mgsu.ru;

Ilya O. Rabbaa — postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2276-8348, ORCID: 0009-0004-8493-9564; ilya_rabbaa@mail.

Contribution of the authors:

Oksana A. Larsen — scientific supervision, study concept, scientific consulting, text revision, final conclusions.

Ilya O. Rabbaa — study concept, material collection, sample preparation, testing, results processing, writing the original text, drawing up the conclusion.

The authors declare that they have no conflict of interest.

Использование боя керамогранитной плитки в качестве замены заполнителей в тяжелых бетонах

Евгений Игоревич Фролов, Роман Владимирович Демидов

Самарский государственный технический университет (СамГТУ); г. Самара, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается возможность замены всех вариантов заполнителей в структуре тяжелого бетона на бой керамогранитной плитки (КГП). Исследование выполняется в рамках сотрудничества с предприятием ООО «Самарский Стройфарфор». Актуальность задачи состоит в использовании данного материала в качестве компонента бетонной смеси, что, в свою очередь, поможет освободить площади на территории предприятия и приведет к возвращению отхода производства в повторный оборот в качестве востребованного товара. Основная цель — исследовать и выявить, как использование боя КГП скажется на физико-механических характеристиках бетона по сравнению с «классическими» заполнителями.

Материалы и методы. В качестве основных материалов применялись: песок речной волжский с модулем крупности 1,4; бой КГП с модулем крупности 2,1; щебень из плотных горных пород фракции 5–20; щебень осадочного происхождения фракции 5–20 мм; бой КГП фракции 5–10 мм; портландцемент ЦЕМ II/В-Ш 42,5Н; вода водопроводная.

Результаты. Для оценки возможности применения боя КГП в качестве заполнителя для бетонов проведено несколько экспериментальных исследований. Результат этой работы предполагал изучение основных физико-механических характеристик бетонов, таких как плотность и прочность при сжатии на образцах-кубах. Прочность при сжатии образцов определялась в промежуточном возрасте — 7 суток и проектном возрасте — 28 суток. В результате выявлены оптимальные соотношения заполнителей в составах бетонов.

Выводы. Полученные результаты продемонстрировали возможность использования боя КГП в составах тяжелых бетонов без ухудшения их физико-механических характеристик, в отдельных случаях даже их улучшение. Применение боя КГП в чистом виде нецелесообразно. В смеси с обычным мелким песком или щебнем из плотных горных пород производство бетонов на предприятиях строительной индустрии может быть налажено в полном объеме.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бетон, керамогранит, прочность при сжатии, мелкий заполнитель, крупный заполнитель, плотность, вяжущее вещество, адгезия

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSSE-2026-0003) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета. Авторы будут благодарны за конструктивные замечания со стороны рецензентов, что может направить исследование в новое русло.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Фролов Е.И., Демидов Р.В. Использование боя керамогранитной плитки в качестве замены заполнителей в тяжелых бетонах // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 4. С. 604–614. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.604-614

Автор, ответственный за переписку: Роман Владимирович Демидов, drv782010@mail.ru.

The use of crushed porcelain stoneware tiles as a substitute for aggregates in heavy concrete

Evgeny I. Frolov, Roman V. Demidov

Samara State Technical University; Samara, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The possibility of replacing all types of aggregate in heavy concrete with crushed porcelain stoneware tiles (PST) is being considered. The work is carried out within the framework of cooperation with the enterprise for the production of sanitary products and porcelain stoneware — “Samara Stroyfarfor” LLC. The urgency of the task is to use this material as a component of the concrete mix, which in turn will help to free up space on the territory of the enterprise and lead to the return of production waste to reuse as a sought-after product. The main purpose of the study is to identify how the use of crushed PST will affect the physical and mechanical characteristics of concrete in comparison with “classical” aggregates.

Materials and methods. The main materials used were: Volga river sand with a grain size of 1.4; PST waste with a grain size of 2.1; crushed stone from dense rocks (manufacturer Orsky Crushed Stone Plant, branch of JSC PNK), fractions 5–20; crushed stone of sedimentary origin (manufacturer Ivanteevsky Stone Quarry), fractions 5–20 mm; PST waste, fractions 5–10 mm; the binder is Portland cement CEM II/V-W 42.5N; tap water.

Results. Several experimental studies were conducted to evaluate the possibility of using porcelain stoneware as a filler for concrete. The result of this work involved studying the basic physical and mechanical characteristics of concrete, such as density and compressive strength on cubic specimens. The hardening took place under normal conditions. The compressive

strength of the specimens was determined at an intermediate age of 7 days and a design age of 28 days. In the process, optimal ratios of aggregates, both fine and coarse, in concrete compositions were identified.

Conclusions. The results obtained indicate the possibility of using a large granite slab in heavy concrete compositions without deterioration of their physical and mechanical characteristics, and in some cases their improvement, however, it should be noted that the use of waste from the production of crushed PST in its pure form is not advisable, both in the case of fine aggregate for concrete and coarse. Mixed with ordinary fine sand or crushed stone from dense rocks, concrete production in the construction industry can be fully established.

KEYWORDS: concrete, granite, compressive strength, fine aggregate, coarse aggregate, density, binder, adhesion

Acknowledgments. This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (subject No. FSSE-2026-0003) as part of a state assignment to Samara State Technical University. The authors would be grateful for constructive comments from the reviewers, which may help direct the research in new directions.

FOR CITATION: Frolov E.I., Demidov R.V. The use of crushed porcelain stoneware tiles as a substitute for aggregates in heavy concrete. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(4):604-614. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.604-614 (rus.).

Corresponding author: Roman V. Demidov, drv782010@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Использование строительных отходов в качестве добавок или ингредиентов для бетонных составов является ключевой проблемой по ряду важных аспектов. Это защита окружающей среды, эффективное применение уже израсходованной энергии (энергосбережение), замена природных невосполняемых ресурсов, повышение качества конечных продуктов либо получение материала с приемлемыми физико-механическими характеристиками [1].

Из литературных источников известно [2–9], что с применением отходов различных производств можно получать следующие бетонные композиции:

- высокоэффективные самоуплотняющиеся бетоны, в которых используют в качестве сырьевых компонентов щебень из дробленого бетона фракции 5–10 мм или микрозаполнитель из переработанного железобетонного и бетонного лома, образующийся при демонтаже зданий [2, 3];
- жаростойкие бетоны на основе фосфатных связующих, в состав которых входят отходы химической промышленности (алюмосодержащего нанотехногенного сырья) и топливно-энергетического комплекса [4] в виде инертных заполнителей. Шлам, полученный на Самарском металлургическом заводе [5], используется с целью синтеза вяжущих компонентов для жаростойких бетонов. Отходы цветной металлургии (ватержакетный шлак и шлак от выплавки безуглеродистого феррохрома) [6] применяются в качестве железо- и алюмосодержащего наполнителя в жаростойком бетоне;
- тяжелый бетон с использованием золы-уноса (как частичная замена цемента), получаемой при сжигании угля на тепловых электростанциях [7];
- мелкозернистый бетон с использованием минеральных порошков, полученных из кирпичного боя (выполняющих роль центров кристаллизации при образовании гидросиликатов, как не обладающих активностью в процессе гидратации), как замена части цемента [8];
- высокопрочный бетон классов В60–В80, в которых в качестве мелкого заполнителя совместно

с мелким кварцевым песком применяется отсев дробления гравия Камского месторождения фракции 0–5 мм [9].

Таким образом, можно сделать вывод, что использование отходов разнообразного производства при включении их в состав бетонных композиций способствует сохранению ресурсов и расширению сырьевой базы для получения данных видов строительных материалов.

Несколько слов надо сказать об уже выработанных технологических подходах [2], а именно о соблюдении последовательности процессов обращения с отходами на примере бетонного лома — это демонтаж зданий, организация транспортных операций, линия переработки железобетонного и бетонного лома, складирование и контроль качества получаемого продукта в заводских условиях производства. Аналогичный подход можно спроецировать при использовании других видов отходов. Есть упоминание [10] о разработанной технологической линии по переработке бетонных и железобетонных отходов с блоком предварительной обработки в аппаратах вихревого слоя, которая даст возможность снизить себестоимость инертного заполнителя для производства мелкозернистых бетонов при замене портландцемента обработанными бетонными отходами в количестве до 20 % с прочностью на 20–27 % ниже контрольных составов. В завершение рассмотренного выше подхода нельзя не отметить, что уже разработан и утвержден ГОСТ Р 72255–2025 (новый российский государственный стандарт, который устанавливает общие требования к щебню и песку вторичным из дробленого бетона и железобетона, получаемым из отходов строительных материалов при сносе зданий), вводится в действие с 1 июня 2026 г.

Несомненно, надо привести результаты, как конкретно влияет использование разнообразных отходов производств на характеристики получаемых бетонов. Так, замена природных каменных материалов на вторичный щебень (соответствующий нормативным требованиям, предъявляемым к крупным заполнителям), полученный при сносе зданий и браке при производ-

стве железобетонных изделий (ЖБИ), позволяет получать бетон класса В25–В30 и в ряде случаев с повышенным значением прочности на 12 % по сравнению с контрольными составами [11]. А при замещении гранитного щебня и отсева его дробления продуктами переработки бетонного лома свойства самоуплотняющегося бетона, хоть и ухудшаются, но все-таки дают возможность получать самоуплотняющийся бетон с прочностью 65–70 МПа [12].

Также установлено, что даже полная замена природного крупного заполнителя на бетонный щебень приводит к получению бетонов с деформативно-прочностными характеристиками, которые соответствуют всем необходимым требованиям для традиционных бетонов [13]. В работе [14] указывается на то, что прочность сцепления заполнителя (из кирпичных отходов, выступающих как крупный заполнитель) с цементным камнем (ЦК) значительно выше, чем прочность заполнителя. А высокая шероховатость поверхности легких вторичных заполнителей из кирпичного боя обеспечивает хорошее сцепление между ЦК и заполнителем. Наблюдается повышенная способность к деформации заполнителя, снижается отрицательное влияние на усадку ЦК, что позитивно сказывается на структуре бетона, предотвращая появление усадочных микротрещин. Использование золы-уноса в качестве активной минеральной добавки в бетонах на основе сульфатостойкого портландцемента [15], обладающих пуццоланическими свойствами, позволяет увеличивать прочность до 20 % замещения цемента в составе бетонной смеси. При введении минеральной добавки на основе молотого доменного шлака [16] в количестве от 10 до 30 %, так же как замена части цемента, незначительно увеличивается подвижность бетонной смеси и прочность бетона в целом.

В ряде научных публикаций [17–22] описывается использование отходов производств, таких как мелкий или крупный заполнитель. Карьерная пыль применяется в качестве мелкого заполнителя, она придает бетону дополнительные преимущества при использовании совместно с ней органических ингибиторов (метилдиэтаноламин, моноэтаноламин) в части замедления коррозии арматурной стали из-за попадания на нее хлоридов [17]. Проведен обзор источников по возможности и целесообразности замены натурального (речного) песка на искусственный песок (manufactured sand) при приготовлении бетонных смесей [18]. Что касается использования разнообразных отходов (бетонный лом, бой керамической плитки, керамика и гранитные изделия) в качестве крупного заполнителя, авторы настоящего исследования нашли следующие сведения. Вторичный щебень из бетонного лома с маркой по дробимости М600 может применяться для получения бетонов класса В40 с морозостойкостью F200, по своим свойствам он не уступает бетону на природном заполнителе с маркой по дробимости М1200 [19].

Рассматриваются варианты полной или частичной замены на первом этапе мелкого заполнителя в бетоне, на втором крупного заполнителя отходом боя керамогранитной плитки (КГП) (рис. 1).

В труде [20] приводятся наиболее близкие к настоящей работе сведения по использованию керамической плитки как крупнозернистого заполнителя с коэффициентом замещения от 20 до 100 %, полученные результаты подтверждают возможность замены природного заполнителя с минимальными изменениями механических свойств. В исследовании [21], где так же в качестве заполнителя использовалась КГП, результаты показали снижение прочности бетона с увеличением доли отходов керамической плитки. Однако добавление 10 % КГП в бетон представляется приемлемым, поскольку снижение прочности относительно небольшое. Водопоглощение и пустоты возрастают по мере увеличения количества заполнителя из отходов КГП. В публикации [22], в отличие от подходов в двух предыдущих статьях, применялся более узкий шаг (6 %) при замене натурального крупного заполнителя смесью отходов керамики и гранита в интервале от 6 до 36 % (оптимальным значением оказалась замена крупного заполнителя на 24 %, что дало прирост в прочности при сжатии с 29,7 МПа у контрольного образца до 37,9 МПа для рассматриваемого).

В рамках сотрудничества с ООО «Самарский Стройфарфор» использование боя КГП в качестве мелкого и крупного заполнителя для тяжелых бетонов является работой по возможной утилизации данного вида отхода, образующегося на производстве.

Керамогранит довольно молодой строительный материал, широкое распространение он начал получать в 80-х гг. прошлого века. Линия по производству керамогранита в Самарской области на предприятии ООО «Самарский Стройфарфор» стартовала в 2004 г. с производительностью до 1,5 млн м² в год, а к 2019 г. производительность предприятия выросла до 5 млн м² в год, что, конечно, сказалось на увеличении образующегося отхода.

Керамогранит в своем составе содержит каолин, кварцевый песок, пигменты и красители. Высокотехнологическая линия предприятия позволяет получать материал с высокими показателями прочности и износостойкости. Этого добиваются путем тщательного контроля состава, высоких давлений прессования (до 50 МПа) и температур обжига 1200 °С, что в среднем на 150–200 °С выше, чем для производства обычной керамики. При таких способах производства материал меняет свою структуру, спекается, образуя монолит [23].

Однако следует отметить, что производство керамогранита сложный технологический процесс как с точки зрения изготовления, так и с точки зрения организации производственного процесса [24]. Также смена поставщиков сырьевых материалов не всег-



Рис. 1. Общий вид: *a* — мелкого заполнителя из боя КГП; *b* — крупного заполнителя из боя КГП; *c* — отдельных зерен боя КГП, используемого в качестве крупного заполнителя

Fig. 1. General view: *a* — fine aggregate from crushed PST; *b* — coarse aggregate from crushed PST; *c* — individual particles of crushed PST used as coarse aggregate

да благоприятно сказывается на качестве сырьевой массы, что в некоторых случаях приводит к образованию дополнительного брака конечной продукции. Около 90 % отходов повторно используют в производстве, но много материала в виде брака и боя остается на специализированных площадках (рис. 2), этот объем отходов в среднем составляет около 1200 т в год.



Рис. 2. Вид боя КГП на производственном предприятии

Fig. 2. General view of crushed PST at the production site

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основной сырьевой материал, применяемый в работе, — это бой керамогранита. Производство керамогранита строго нормируется требованиями соответствующего стандарта (ГОСТ 13996–2019 «Плитки керамические. Общие технические условия»). Данный нормативный документ предусматривает высокие эксплуатационные свойства керамогранита, например: водопоглощение не более 0,5 %, морозостойкость не менее 150 циклов, твердость по Моосу не менее 6 и т.д. Можно сделать вывод, что и бой КГП сохранит ряд свойств, на основании которых предполагается, что и бетоны на таком материале тоже получат ряд преимущественных особенностей и характеристик.

Ключевые характеристики используемых в исследовании сырьевых материалов следующие:

1) крупный заполнитель:

- бой КГП фракции 5–10 мм, насыпная плотность — 1,28 г/см³, истинная плотность, определенная с использованием прибора Ле-Шателье — 2,39 г/см³, среднее значение дробимости — 8,3 %;

• щебень из плотных горных пород (производитель ОАО «Орский щебеночный завод» — филиал АО «Первая нерудная компания») фракции 5–20 мм, насыпная плотность — 1,45 г/см³, истинная плотность — 2,76 г/см³, среднее значение дробимости — 10,7 %;

• щебень осадочного происхождения (производитель ОАО «Ивантеевский каменный карьер») фракции 5–20 мм, насыпная плотность — 1,31 г/см³, истинная плотность — 2,59 г/см³, среднее значение дробимости — 14,2 %;

2) мелкий заполнитель:

• песок речной волжский по основной классификации относится к группе очень мелких, с модулем крупности 1,4;

• бой КГП по основной классификации относится к группе средних, с модулем крупности 2,1;

3) вяжущее вещество: портландцемент ЦЕМ II/В-Ш 42,5Н;

4) вода водопроводная.

Бой КГП после помола подвергался дополнительному рассеву для исключения фракций менее 5 мм в случае крупного заполнителя. При использовании боя керамогранита в качестве мелкого заполнителя удалялась пылевидная составляющая размером менее 0,16 мм.

Следует отметить, что заполнитель в бетоне — это один из основных компонентов бетонной смеси, который занимает большую часть объема и обеспечивает прочность, стабильность и другие физические свойства бетона, поэтому оптимальный выбор и соотношение заполнителей влияют на конечные характеристики бетона и его пригодность для конкретных задач в строительстве [25].

Главная цель исследования — изучение основных физико-механических характеристик бетонов, полученных на основе заполнителей из боя КГП как мелкого, так и крупного, и по отдельности.

Ключевая задача исследования — определение физико-механических свойств бетонов, таких как средняя плотность и прочность при сжатии,

приготовленных с использованием заполнителей (мелкого и крупного) из боя КГП.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение свойств боя КГП в качестве мелкого заполнителя включало этапы:

• изготовление образцов согласно ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» с размером ребра 100 мм;

• изготовление образцов-кубов для промежуточного испытания на 7-е сутки;

• изготовление образцов-кубов для определения основных характеристик в проектном возрасте — 28 сут.

Изготовленные образцы имели следующие составы:

• состав № 1: без боя КГП, 100 % мелкого заполнителя — речной волжский песок (далее — П), контрольный состав для сравнения;

• состав № 2: 25 % массы П заменено на бой КГП (далее — Б);

• состав № 3: 50 % массы П заменено на Б КГП;

• состав № 4: 75 % массы П заменено на Б КГП;

• состав № 5: П не использовался, 100 % мелкого заполнителя, это Б КГП.

Составы для тяжелых бетонов подбирались по методу абсолютных объемов. При проектировании процентного содержания компонентов в смеси авторы закладывали марку бетона на прочность не ниже В25 на 28-е сут нормального твердения и показатель подвижности П2. Испытания по определению прочности при сжатии выполнялись на гидравлическом прессе МС-500. Для установления показателя подвижности применялся конус с размерами d — 100 мм, D — 200 мм, H — 300 мм (нормальный) согласно ГОСТ 10181–2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний». Полученный после расчета расход компонентов для составов указан в табл. 1. Значения плотности и прочности на сжатие на 7-е и 28-е сутки приведены в табл. 2, 3.

Табл. 1. Содержание сырьевых материалов в 1 м³ бетона класса В25

Table 1. The content of raw materials in 1 m³ of concrete of class В25

Расход материалов, кг/м ³ Consumption of materials, kg/m ³	Состав № 1 Composition No. 1	Состав № 2 Composition No. 2	Состав № 3 Composition No. 3	Состав № 4 Composition No. 4	Состав № 5 Composition No. 5
Цемент / Cement	367	375	383	392	433
Вода / Water	220	225	230	235	260
Щебень / Crushed stone	1088	1088	1088	1088	1088
Песок / Sand	658	478	309	149	–
Бой / Crushed PST	–	149	288	418	462

Табл. 2. Показатель средней плотности и прочности при сжатии на 7-е сутки твердения (мелкий заполнитель)

Table 2. Index of average density and compressive strength on the 7th day of hardening (fine aggregate)

Состав Composition	Плотность ρ , г/см ³ / Density ρ , g/cm ³				Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа Compressive strength $R_{сж}$, МПа			
	1	2	3	Среднее Average	1	2	3	Среднее Average
1	2,32	2,37	2,32	2,34	21,0	21,5	21,8	21,4
2	2,26	2,24	2,30	2,27	21,2	21,6	21,8	21,5
3	2,30	2,22	2,24	2,25	21,9	21,4	21,7	21,7
4	2,19	2,23	2,23	2,22	22,5	22,1	21,6	22,1
5	2,24	2,20	2,17	2,20	26,4	24,3	23,1	24,6

Табл. 3. Показатель средней плотности и прочности при сжатии на 28-е сутки твердения (мелкий заполнитель)

Table 3. Index of average density and compressive strength on the 28th day of hardening (fine aggregate)

Состав Composition	Плотность ρ , г/см ³ / Density ρ , g/cm ³				Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа Compressive strength $R_{сж}$, МПа			
	1	2	3	Среднее Average	1	2	3	Среднее Average
1	2,30	2,34	2,31	2,32	33,6	33,5	34,2	33,8
2	2,26	2,23	2,28	2,26	31,6	32,1	32,0	31,9
3	2,22	2,19	2,23	2,22	33,3	33,6	33,9	33,6
4	2,19	2,20	2,21	2,20	36,9	38,8	37,4	37,7
5	2,23	2,19	2,15	2,19	37,3	38,2	36,4	37,3

Осадка конуса при контрольном замесе в отсутствии мелкого заполнителя на основе боя керамогранита составила 5 см, что соответствует подвижности П2 при водоцементном отношении (В/Ц) 0,6. Для остальных составов было принято условие соблюдения полученных параметров.

В процессе эксперимента установлено, что при водопоглощении, близком к нулевой отметке у кварцевого песка, вода тратилась на смачивание зерен мелкого заполнителя [26], так как он относится к группе очень мелких, расход воды был увеличен. При работе с боем КГП для получения требуемой подвижности, равной П2, количество воды требовалось большее, скорее всего это объясняется тем, что показатель смачиваемости зерен боя КГП несколько выше. Таким образом, чтобы сохранить подвижность смеси на уровне П2 при увеличении доли боя КГП требовалось больше воды, что, согласно расчетам, увеличивало расход цемента при неизменном В/Ц = 0,6.

Расход вяжущего вещества возрастал при повышении содержания в структуре бетонной смеси боя КГП и в составе без использования кварцевого песка привел к увеличению расхода на 18,2 % по сравнению с контрольным составом. Такой рост расхода цемента делает использование боя керамогранита как полной замены мелкого заполнителя невыгодным из-за роста себестоимости материала.

Плотность образцов-кубов с боем КГП снижалась с ростом его доли из-за меньшей плотности КГП — 2,39 г/см³ по сравнению с песком — 2,5 г/см³ (значение истинной плотности речного волжского песка, согласно

данным производителя). Прочность на 7-е сут показывала стабильный рост для всех составов без резких изменений относительно контрольного, наибольшее значение на данном этапе показал состав со 100%-ной заменой речного волжского песка. Прирост прочности составил 14,9 %. Объясняется этот прирост прочности большим расходом портландцемента ЦЕМ II/В-Ш 42,5Н. На 28-е сут прочность состава № 2 (25 % КГП) была на 5,6 % ниже контрольного. В составе № 3 (50 % КГП) отмечались минимальные изменения. Состав № 4 (75 % КГП) показал прирост прочности на 11,5 % по сравнению с контрольным, что является лучшим результатом. Состав № 5 (100 % КГП) также дал прирост прочности (10,3 %), но из-за высокого расхода цемента (18,2 %) его использование экономически нецелесообразно. Состав № 4 (75 % КГП) оказался оптимальным для применения в общестроительных бетонах как мелкий заполнитель [25].

Второй этап исследования посвящен изучению боя КГП как крупного заполнителя. Изготавливались смеси с разным содержанием КГП, из которых формовались кубы с размером ребра 100 мм. После распалубки образцы помещались в камеру нормального твердения и в дальнейшем были проведены испытания:

- промежуточные на 7-е сут;
- в проектном возрасте на 28-е сут.

Серии для исследования крупного заполнителя на основе боя КГП в составе бетона (шаг замены равен 25 %) включали:

- состав № 1: контрольный, 100 % щебня из плотных пород (далее — Щ);

• состав № 2: 25 % Щ заменено на Б КГП;
• состав № 3: 50 % Щ заменено на Б КГП;
• состав № 4: 75 % Щ заменено на Б КГП;
• состав № 5: 100 % Б КГП, без щебня.

Подбор состава проводился по методу абсолютных объемов с целевыми параметрами: класс бетона по прочности В25, подвижность ПЗ, нормальные условия твердения. Испытания выполнялись на прессе МС-500. Расход материалов указан в табл. 4, результаты плотности и прочности — в табл. 5, 6.

Прочность при сжатии на 7-е сут показывала рост (кроме состава № 2) при увеличении расхода боя КГП в своей структуре по сравнению с контрольным составом, однако при полной замене щебня из плот-

ных горных пород на 100 % боя керамогранита произошло значительное снижение прочности в пределах 26 % по сравнению с составом № 1.

Рассмотрев полученные в результате эксперимента значения по всем составам (на 28 сут) и сравнив их с контрольным составом № 1, можно зафиксировать следующие изменения прочности:

- состав № 2 — прирост прочности 7,6 %;
- состав № 3 — прирост прочности 0,3 %;
- состав № 4 — потеря прочности 7,0 %;
- состав № 5 — потеря прочности 19,7 %.

Потеря прочности вызвана более низкой адгезией боя КГП с основной матрицей бетонной смеси. Зерна боя КГП имеют в некотором случае одну

Табл. 4. Содержание сырьевых материалов в 1 м³ бетона класса В25

Table 4. The content of raw materials in 1 m³ of concrete of class В25

Вид материала Type of material	Состав № 1 Composition No. 1	Состав № 2 Composition No. 2	Состав № 3 Composition No. 3	Состав № 4 Composition No. 4	Состав № 5 Composition No. 5
	Расход материалов, кг/м³ / Consumption of materials, kg/m³				
Портландцемент ЦЕМ II/В-Ш 42,5Н Portland cement CEM II/B-W 42.5N	334				
Вода водопроводная / Tap water	200				
Песок речной волжский / Volga River sand	630	627	622	614	609
Щебень / Crushed stone	1205	901	600	300	–
Бой / Crushed PST	–	266	522	799	1064

Табл. 5. Показатель средней плотности и прочности при сжатии на 7-е сутки твердения (крупный заполнитель)

Table 5. Index of average density and compressive strength on the 7th day of hardening (coarse aggregate)

Состав Composition	Плотность ρ, г/см³ / Density ρ, g/cm³				Прочность на сжатие R _{сж} , МПа Compressive strength R _{сж} , MPa			
	1	2	3	Среднее Average	1	2	3	Среднее Average
1	2,50	2,50	2,52	2,50	20,2	21,0	19,5	20,2
2	2,50	2,40	2,40	2,43	24,1	20,9	15,2	20,1
3	2,40	2,40	2,40	2,40	23,3	21,4	22,4	22,4
4	2,31	2,30	2,30	2,30	21,9	23,4	24,3	23,2
5	2,22	2,20	2,24	2,22	13,9	17,4	13,8	15,0

Табл. 6. Показатель средней плотности и прочности при сжатии на 28-е сутки твердения (крупный заполнитель)

Table 6. Index of average density and compressive strength on the 28th day of hardening (coarse aggregate)

Состав Composition	Плотность ρ, г/см³ / Density ρ, g/cm³				Прочность на сжатие R _{сж} , МПа Compressive strength R _{сж} , MPa			
	1	2	3	Среднее Average	1	2	3	Среднее Average
1	2,51	2,53	2,50	2,51	31,9	30,7	31,7	31,4
2	2,44	2,45	2,47	2,45	34,0	34,4	33,1	33,8
3	2,38	2,40	2,43	2,40	30,5	31,7	32,4	31,5
4	2,26	2,29	2,27	2,27	30,2	27,4	29,9	29,2
5	2,23	2,24	2,21	2,23	25,5	24,4	25,7	25,2

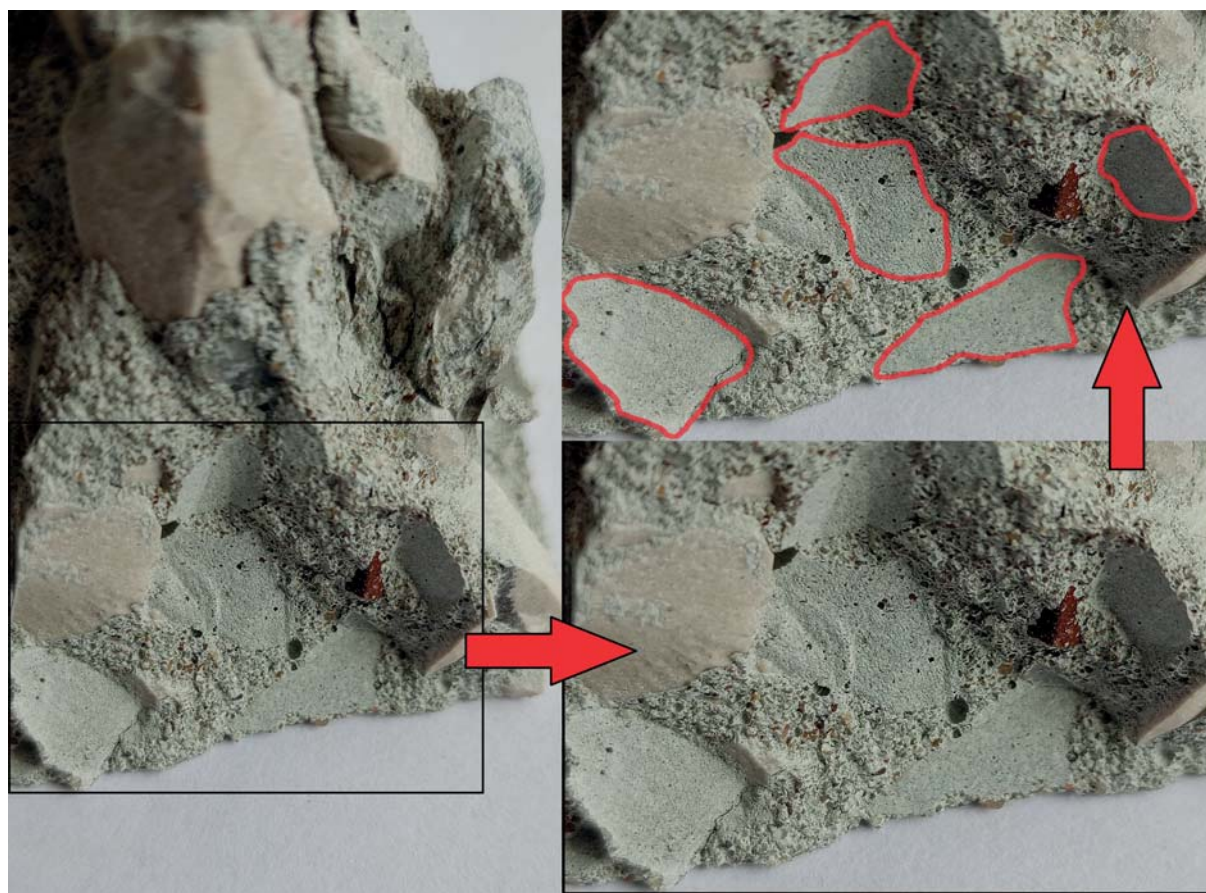


Рис. 3. Зоны отслоения зерен боя КГП в структуре тяжелого бетона

Fig. 3. The zones of detachment of grains of crushed PST in the structure of heavy concrete

из граней с явно выраженной гладкой поверхностью, покрытой глазурью, что снижает сцепление с цементным камнем. Зоны отсутствия сцепления хорошо видны на рис. 3.

При очевидных недостатках по составу № 2 наблюдается прирост прочности, что обусловлено созданием оптимального зернового состава, достигнутого за счет смешивания различных фракций крупного заполнителя. Снижение количества зерен боя КГП нивелирует их влияние адгезии к цементному камню, так как они распределяются по объему в меньшем количестве, что приводит к общему повышению прочности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно проведенному комплексному литературному обзору по теме исследования не остается сомнений, что работы в направлении применения отходов различных производств стали более актуальны в последнее время и их необходимо продолжать.

Применение боя керамогранитной плиты в чистом виде как мелкого заполнителя оказалось неэффективным и приводящим к перерасходу вяжущего вещества. Однако его использование в сочетании с мелкозернистым кварцевым песком в пределах от 1:1 до 3:1 (Б:П) демонстрирует потенциал

для применения в производстве бетонов общестроительного назначения. Также снижение плотности бетона с использованием боя КГП позволяет в некоторой степени снизить вес конструкции.

Применение отхода от производства керамогранита в чистом виде в качестве крупного заполнителя в соответствии с результатами эксперимента нецелесообразно ввиду потери в прочности почти на 20 %, однако в смеси с щебнем в пропорции Б:Щ от 1:3 до 1:1 отмечаются результаты, сопоставимые с контрольным образцом, исходя из этого такой бетон можно использовать на предприятиях строительной индустрии для производства как товарного бетона, так и ЖБИ.

С целью увеличения вовлечения отхода в виде боя КГП необходимо двигаться в сторону его комплексного использования (одновременно как крупного, так и мелкого заполнителя), а также решить проблему повышения адгезии боя КГП как крупного заполнителя путем нахождения дешевого способа частичного или полного снятия глазури с внешней поверхности частиц.

Результаты полученных экспериментальных данных показали, что использование боя КГП в технологии изготовления бетона актуально, и эту работу следует продолжить.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Волынкина Е.П.* Анализ состояния и проблем переработки техногенных отходов в России // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2017. № 2 (20). С. 43–49. EDN YTOUCP.
2. *Ларсен О.А., Наруть В.В., Воронин В.В.* Технология переработки бетонного лома с целью получения самоуплотняющегося бетона // Строительство и реконструкция. 2020. № 2 (88). С. 61–66. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-61-66. EDN HTTFQF.
3. *Наруть В.В., Ларсен О.А.* Самоуплотняющиеся бетоны на основе бетонного лома сносимых жилых зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 2. С. 52–58. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.02.52-58. EDN HBXNIF.
4. *Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С.* Использование в производстве жаростойких бетонов алюмосодержащего нанотехногенного сырья и отходов углеобогащения // Строительство и реконструкция. 2021. № 1 (93). С. 96–105. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-93-1-96-105. EDN QCHFZC.
5. *Соколова С.В., Баранова М.Н., Васильева Д.И., Холопов Ю.А.* Вторичное использование глиноземсодержащих отходов промышленности для синтеза жаростойких бетонов // Строительные материалы. 2023. № 4. С. 20–23. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-812-4-20-23. EDN UHFWMF.
6. *Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С.* Использование отходов цветной металлургии и ортофосфорной кислоты в производстве жаростойкого бетона // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 2. С. 42–48. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.02.42-48. EDN TTLWFO.
7. *Пузатова А.В., Дмитриева М.А., Захаров А.А., Лейцин В.Н.* Зола-уноса при производстве бетонов различного назначения и сухих строительных смесей // Строительство и реконструкция. 2023. № 5 (109). С. 132–147. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-109-5-132-147. EDN CJJALC.
8. *Дроздюк Т.А., Айзеништадт А.М., Перишин З.А., Данилов В.Е.* Мелкозернистый бетон с добавкой высокодисперсного порошка кирпичного боя // Строительные материалы. 2024. № 9. С. 30–35. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-828-9-30-35. EDN VVVDYY.
9. *Нестерова К.О., Гиззатуллин А.Р., Морозова Н.Н., Гайнутдинов И.И., Хозин В.Г.* Цементные бетоны классов В60–В80 с применением дробленого гравия Камского месторождения // Строительные материалы. 2024. № 10. С. 29–36. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-829-10-29-36. EDN JPIWJP.
10. *Ибрагимов Р.А., Зигангирова Л.И.* Технология рециклинга бетонных отходов // Строительные материалы. 2025. № 1–2. С. 54–59. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-832-1-2-54-59. EDN EOOYXJ.
11. *Сидорова А.С., Анцупова С.Г., Попов А.Л.* Физико-механические характеристики тяжелого бетона с использованием местного вторичного сырья // Строительные материалы. 2020. № 9. С. 9–14. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-784-9-9-14. EDN KOQNAI.
12. *Коровкин М.О., Ерошкина Н.А., Егоров А.Ю., Шестернин А.И.* Свойства самоуплотняющегося бетона, изготовленного с применением продуктов переработки бетонного лома // Региональная архитектура и строительство. 2023. № 4 (57). С. 115–121. DOI: 10.54734/20722958_2023_4_115. EDN DGVMMRA.
13. *Аль-Хаваф А.Ф.К., Никулин А.И.* Анализ деформативно-прочностных характеристик бетонов, изготовленных с добавлением крупного заполнителя из бетонного щебня // Строительные материалы. 2020. № 10. С. 22–30. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-785-10-22-30. EDN RGSMSH.
14. *Джаббаров Н.Э., Наджафова Э.А., Кахраманлы Ю.Н.* Свойства бетона с заполнителем из кирпичных отходов // Строительные материалы. 2024. № 9. С. 36–43. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-828-9-36-43. EDN GQXVWC.
15. *Хунг Н.С., Лам Т.В., Булгаков Б.И., Александрова О.В., Ларсен О.А.* Влияние содержания золы-уноса на прочность бетонов на основе сульфатостойкого портландцемента // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 1. С. 51–58. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.01.51-58. EDN UXVZCO.
16. *Смирнов Д.С., Мавлиев Л.Ф., Хузиахметова К.Р., Мотыйгуллин И.Р.* Влияние минеральной добавки на основе молотого доменного шлака на свойства бетонов и бетонных смесей // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. № 4 (62). С. 61–69. DOI: 10.52409/20731523_2022_4_61. EDN KQDLZR.
17. *Padmanaban A., Sathish N., Karthik A.* Experimental Investigation on Strength and Durability Characteristics of Concrete Developed by using Quarry Dust as Fine Aggregate // International Journal of ChemTech Research. 2017. Vol. 10. Issue 11. Pp. 109–119.
18. *Singh Er.H., Chandaliya Er.A.* USE of M-SAND in Conventional Concrete : a Review // International Journal of Research and Scientific Innovation. 2023. Vol. X. Issue VIII. Pp. 53–58. DOI: 10.51244/ijrsi.2023.10805
19. *Красникова Н.М., Кириллова Е.В., Хозин В.Г.* Вторичное использование бетонного лома в качестве сырьевых компонентов цементных бетонов // Строительные материалы. 2020. № 1–2. С. 56–65. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-56-65. EDN ZWVWLD.

20. Anderson D.J., Smith S.T., Au F.T.K. Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 117. Pp. 20–28. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.153
21. Paul S.Ch., Faruky S.A.U., Babafemi A.J., Miah Md.J. Eco-friendly concrete with waste ceramic tile as coarse aggregate: mechanical strength, durability, and microstructural properties // *Asian Journal of Civil Engineering*. 2023. Vol. 24. Issue 8. Pp. 3363–3373. DOI: 10.1007/s42107-023-00718-x
22. Srinivas K., Kranthi Vijaya S., Jagadeeswari K. Concrete with ceramic and granite waste as coarse aggregate // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 37. Pp. 2089–2092. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.521
23. ООО «Самарский Стройфарфор»: керамогранит, который служит вечно // *Строительство*. 2008. № 4. С. 160–161. EDN JKAURN.
24. Журавлев М.М. Применение и технология производства керамического гранита // *Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН*. 2022. № 4 (91). С. 51–55. DOI: 10.33580/2541-9684-2022-91-4-51-55. EDN QKBXXX.
25. Баженов Ю.М. Технология бетона. М. : ACB, 2003. 500 с.
26. Фролов Е.И., Демидов Р.В., Анцев М.А. Использование боя керамогранитной плитки как замена мелкого заполнителя в тяжелых бетонах // *Градостроительство и архитектура*. 2025. Т. 15. № 1 (58). С. 83–89. DOI: 10.17673/Vestnik.2025.01.12. EDN XBLWYK.

Поступила в редакцию 10 ноября 2025 г.

Принята в доработанном виде 4 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 4 февраля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Евгений Игоревич Фролов — кандидат химических наук, доцент, заведующий кафедрой производства строительных материалов, изделий и конструкций; Самарский государственный технический университет (СамГТУ); 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; SPIN-код: 5132-5712, РИНЦ ID: 611105, Scopus: 16042188100, ResearcherID: D-5631-2014, ORCID: 0000-0003-1830-0581; frolov.ei@samgtu.ru;

Роман Владимирович Демидов — старший преподаватель кафедры производства строительных материалов, изделий и конструкций; Самарский государственный технический университет (СамГТУ); 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; SPIN-код: 7411-8660, РИНЦ ID: 830798, Scopus: 57192559578, ResearcherID: O-1477-2016, ORCID: 0000-0002-4792-4724; drv782010@mail.ru.

Вклад авторов:

Фролов Е.И. — идея, обзор литературы, редактирование текста статьи.

Демидов Р.В. — проведение испытаний, обработка результатов, написание первоначального текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Volynkina E.P. Analysis of the state and problems of processing technogenic waste in Russia. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2017; 2(20):43-49. EDN YTOUCP. (rus.).
2. Larsen O.A., Naruts V.V., Voronin V.V. Concrete recycling technology for self-compacting concrete. *Building and Reconstruction*. 2020; 2(88):61-66. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-61-66. EDN HTTFQF. (rus.).
3. Naruts V.V., Larsen O.A. Self-compacting concrete on the basis of concrete scrap of demolished residential buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 2:52-58. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.02.52-58. EDN HBXHIF. (rus.).
4. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. Use of aluminum-containing nanotechnogenic raw materials and carbon waste in the production of heat-resistant concrete. *Building and Reconstruction*. 2021; 1(93):96-105. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-93-1-96-105. EDN QCHFZC. (rus.).
5. Sokolova S.V., Baranova M.N., Vasilieva D.I., Kholopov Y.A. Recycling of alumina-containing industrial waste for the synthesis of heat-resistant concrete. *Construction Materials*. 2023; 4:20-23. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-812-4-20-23. EDN UHFWMF. (rus.).
6. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. Use of non-ferrous metallurgy waste and orthophosphoric acid in the production of heat-resistant concrete. *Industrial and Civil Engineering*. 2021; 2:42-48. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.02.42-48. EDN TTLWFO. (rus.).
7. Puzatova A.V., Dmitrieva M.A., Zakharov A.An., Leitsin V.N. Fly ash in the production of concrete for various purpose and dry construction mixtures. *Building and Reconstruction*. 2023; 5(109):132-147. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-109-5-132-147. EDN CJJALC. (rus.).
8. Drozyuk T.A., Ayzenshtadt A.M., Pershin Z.A., Danilov V.E. Fine-grained concrete with the addition of highly dispersed brick scrap powder. *Construction Materials*. 2024; 9:30-35. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-828-9-30-35. EDN VVVDYY. (rus.).
9. Nesterova K.O., Gizzatullin A.R., Morozova N.N., Gainutdinov I.I., Khozin V.G. Class B60-B80 cement concretes using crushed gravel from

the Kama field. *Construction Materials*. 2024; 10:29-36. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-829-10-29-36. EDN JPIWJP. (rus.).

10. Ibragimov R.A., Zigangirova L.I. Concrete waste recycling technology. *Construction Materials*. 2025; 1-2:54-59. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-832-1-2-54-59. EDN EOOYXJ. (rus.).

11. Sidorova A.S., Antsupova S.G., Popov A.L. Physical and mechanical properties of concrete using local secondary raw materials. *Construction Materials*. 2020; 9:9-14. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-784-9-9-14. EDN KOQHAI. (rus.).

12. Korovkin M.O., Eroshkina N.A., Egorov A.Yu., Shesternin A.I. Properties of self-compacting concrete made using products of processing concrete scrap. *Regional Architecture and Engineering*. 2023; 4(57): 115-121. DOI: 10.54734/20722958_2023_4_115. EDN DGVMSRA. (rus.).

13. Al-Khawaf A.F.Q., Nikulin A.I. Analysis of deformative-strength characteristics of concretes, manufactured with addition of coarse aggregate, obtained from concrete rubbles. *Construction Materials*. 2020; 10:22-30. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-785-10-22-30. EDN RGSMSH. (rus.).

14. Jabbarova N.E., Najafova E.A., Gahramanly Yu.N. Properties of concrete with brick waste aggregate. *Construction Materials*. 2024; 9:36-43. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-828-9-36-43. EDN GQXVWC. (rus.).

15. Hung N.X., Lam T.V., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V., Larsen O.A. Effect of fly ash content on strength of concretes based on sulfate-resistant Portland cement. *Industrial and Civil Engineering*. 2021; 1:51-58. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.01.51-58. EDN UXVZCO. (rus.).

16. Smirnov D.S., Mavliev L.F., Khuziakmetova K.R., Motygullin I.R. Effect of mineral additive based on ground blast furnace slag on the properties of concrete and concrete mixtures. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2022; 4(62):61-69. DOI: 10.52409/20731523_2022_4_61. EDN KQDLZR. (rus.).

17. Padmanaban A., Sathish N., Karthik A. Experimental Investigation on Strength and Durability Charac-

teristics of Concrete Developed by using Quarry Dust as Fine Aggregate. *International Journal of ChemTech Research*. 2017; 10(11):109-119.

18. Singh Er.H., Chandaliya Er.A. USE of M-SAND in Conventional Concrete : a Review. *International Journal of Research and Scientific Innovation*. 2023; X(VIII):53-58. DOI: 10.51244/ijrsi.2023.10805

19. Krasnikova N.M., Kyrillova E.V., Khozin V.G. Reuse of concrete waste as input products for cement concretes. *Construction Materials*. 2020; 1-2:56-65. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-56-65. EDN ZWVWLD. (rus.).

20. Anderson D.J., Smith S.T., Au F.T.K. Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*. 2016; 117:20-28. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.153

21. Paul S.Ch., Faruky S.A.U., Babafemi A.J., Miah Md.J. Eco-friendly concrete with waste ceramic tile as coarse aggregate: mechanical strength, durability, and microstructural properties. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2023; 24(8):3363-3373. DOI: 10.1007/s42107-023-00718-x

22. Srinivas K., Kranthi Vijaya S., Jagadeeswari K. Concrete with ceramic and granite waste as coarse aggregate. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 37:2089-2092. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.521

23. OOO Samara Stroyfarfor: porcelain stoneware that lasts forever. *Construction*. 2008; 4:160-161. EDN JKAURN. (rus.).

24. Zhuravlev M.M. Application and production technology of ceramic granite. *Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2022; 4(91):51-55. DOI: 10.33580/2541-9684-2022-91-4-51-55. EDN QKBXXX. (rus.).

25. Bazhenov Yu.M. *Concrete technology*. Moscow, ASV, 2003; 500. (rus.).

26. Frolov E.I., Demidov R.V., Antsev M.A. The use of small granite slabs as a substitute for fine aggregate in heavy concrete. *Urban Construction and Architecture*. 2025; 15(1):(58):83-89. DOI: 10.17673/Vestnik.2025.01.12. EDN XBLWYK. (rus.).

Received November 10, 2025.

Adopted in revised form on February 4, 2026.

Approved for publication on February 4, 2026.

B I O N O T E S: **Evgeny I. Frolov** — Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Production of Building Materials, Products and Structures; **Samara State Technical University**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; SPIN-code: 5132-5712, ID RSCI: 611105, Scopus: 16042188100, ResearcherID: D-5631-2014, ORCID: 0000-0003-1830-0581; frolov.ei@samgtu.ru;

Roman V. Demidov — senior lecturer of the Department of Production of Building Materials, Products and Structures; **Samara State Technical University**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; SPIN-code: 7411-8660, ID RSCI: 830798, Scopus: 57192559578, ResearcherID: O-1477-2016, ORCID: 0000-0002-4792-4724; drv782010@mail.ru.

Contribution of the authors:

Evgeny I. Frolov — idea, literature review, editing of the text of the article.

Roman V. Demidov — conducting tests, processing results, writing the source text of the article.

The authors declare that they have no conflict of interest.

Энергетическая эффективность теплоснабжения
индивидуальных домов с гибридной системой
тепловой генерации

Алексей Леонидович Торопов

Инженерный центр «Апрель» (ИЦ «Апрель»); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В Российской Федерации в эксплуатации находятся 1,5 млн твердотопливных котлов индивидуальных систем теплоснабжения. С учетом плотности населения, экономических факторов использование твердого топлива для индивидуальных домов в ряде регионов будет продолжаться длительное время. Недостатки эксплуатации твердотопливных котлов, связанные с необходимостью ручной загрузки топлива, большого места для хранения топлива, избыточной мощностью и другими проблемами, могут быть частично или полностью решены с помощью гибридных систем теплоснабжения с твердотопливным и электрическим генераторами тепловой энергии. Цель исследования — определение энергетической эффективности, описание алгоритма работы гибридной системы и автоматического переключения тепловых генераторов, оценка эмиссии парниковых газов, экономический анализ затрат на эксплуатацию.

Материалы и методы. Исследования коэффициентов энергетической эффективности проводились на испытательном стенде завода «АРДЕРИЯ» с электрическим тепловым генератором Ардерия ЕС 12. Натурные испытания тепловых потерь дровяных котлов в режиме ожидания выполнялись в Московской области на реальном объекте, оснащенный дровяным пиролизным котлом Rojek KTP20 с номинальной мощностью 20 кВт·ч.

Результаты. Показатели энергетической эффективности твердотопливных тепловых генераторов, рассчитанные для реальных значений тепловой нагрузки в отопительный период, и реального топлива значительно отличаются от лабораторных, декларируемых производителями котлов, и для схем теплоснабжения без тепловых аккумуляторов составляют 50–65 %. Статические потери твердотопливных котлов в режиме ожидания без горения топлива доходят до 1,5 кВт·ч.

Выводы. Применение гибридных схем теплоснабжения индивидуальных домов с системой переключения потоков теплоносителя решает негативные вопросы генерации тепла, характерные для твердотопливных котлов. Экономические затраты при использовании твердого топлива и электричества соизмеримы. Величина углеродоемкости тепловой энергии при применении электрических тепловых генераторов значительно ниже твердотопливных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: энергоэффективность, углеродоемкость, твердое топливо, электрический котел, гибридные системы теплоснабжения, отопление

Благодарности. Автор благодарит рецензентов за замечания по стилю изложения и научно-технической сути, способствующие более глубокому раскрытию темы научной работы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Торопов А.Л. Энергетическая эффективность теплоснабжения индивидуальных домов с гибридной системой тепловой генерации // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 4. С. 615–627. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.615-627

Автор, ответственный за переписку: Алексей Леонидович Торопов, toropov@aprilgroup.ru.

Energy efficiency of heating supply in detached houses with
a hybrid heat generation system

Alexey L. Toropov

Engineering Centre “April”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In the Russian Federation, 1.5 million solid fuel boilers are in operation in individual heating systems. Given population density and economic factors, the use of solid fuel in individual homes in some regions will continue for a long time. The disadvantages of operating solid fuel boilers, such as the need for manual fuel loading, large storage space, excess capacity, and other issues, can be partially or completely resolved by using hybrid heating systems with solid fuel and electric thermal generators. The aim of the study is to determine energy efficiency, describe the operating algorithm of a hybrid system and automatic switching of thermal generators, assessment of greenhouse gas emissions, economic analysis of operating costs.

Materials and methods. Energy efficiency coefficient studies were conducted at the ARDERIA plant's test facility using an Arderia EC 12 electric heat generator. Field tests of heat losses of wood-fired boilers in standby mode were conducted in the Moscow region at a real facility equipped with a Rojek KTP20 wood-fired pyrolysis boiler with a rated output of 20 kWh.

Results. Energy efficiency indicators for solid fuel heat generators, calculated for actual heating loads during the heating season and actual fuel, differ significantly from laboratory values declared by boiler manufacturers and, for heating systems without heat accumulators, amount to 50–65 %. Static losses of solid fuel boilers in standby mode without fuel combustion amount to up to 1.5 kWh.

Conclusions. The use of hybrid heating systems for individual homes with a heat carrier switching system solves the negative heat generation issues typical of solid fuel boilers. The economic costs of using solid fuel and electricity are comparable. The carbon intensity of thermal energy using electric heat generators is significantly lower than that of solid fuel boilers.

KEYWORDS: energy efficiency, carbon intensity, solid fuel, electric boiler, hybrid heating systems, heating

Acknowledgements. The author thanks the reviewers for their comments, both in terms of the style of presentation and the scientific and technical essence, which contribute to a deeper disclosure of the topic of scientific work.

FOR CITATION: Toropov A.L. Energy efficiency of heating supply in detached houses with a hybrid heat generation system. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(4):615-627. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.615-627 (rus.).

Corresponding author: Alexey L. Toropov, toropov@aprilgroup.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Российская Федерация расположена в Северном полушарии и наличие систем теплоснабжения в индивидуальных домах является объективной необходимостью для создания комфортных условий жизни ее населения. Доля тепловых генераторов, использующих твердое углеводородное топливо в индивидуальных многоквартирных домах, последние десятилетия снижается, но до сих пор составляет 17 % жилого фонда¹. В Бурятии, Тыве, Кировской, Курганской, Новгородской областях по сегодняшний день половина домов отапливается дровами, в том числе с применением дровяных печей. Исходя из плотности населения в РФ, расположения месторождений природного газа, экономических факторов, наличия природных энергетических ресурсов, использование твердого топлива для индивидуальных домов в ряде регионов будет продолжаться десятилетия. Переход с твердого на другие виды углеводородного топлива для отопления помещений в этих регионах экономически нецелесообразен [1–3]. В настоящее время в РФ по информации аналитического агентства «Литвинчук маркетинг» для индивидуальных объектов в год продается 50–60 тыс. твердотопливных (дрова, уголь) и 8–10 тыс. пеллетных котлов². С учетом сроков службы и технологического старения, тенденций в динамике продаж данных котлов в последние годы можно оценить объем твердотопливных котлов для индивидуальных домов в России 1,2–1,4 млн шт. с тенденцией стабилизации на ближайшее десятилетие в общем объеме 0,9–1,0 млн шт. Твердотопливные котлы широко применяются в разных странах. В ЕС-27 в 2020 г. в эксплуатации домохозяйств находилось 9

млн твердотопливных котлов (4 % от общего количества), из которых 66 % работали на дровах, пеллетах, 34 % на угле [4].

Основные преимущества теплоснабжения индивидуального дома с твердотопливным тепловым генератором — доступность и относительная дешевизна топлива, отсутствие необходимости в разрешительных документах при строительстве этих систем. Но есть и минусы:

- необходимость периодической ручной загрузки топлива в котел;
- обслуживание котла (чистка от продуктов сгорания, чистка камер сгорания, дымоходов);
- потребность в помещении для хранения твердого топлива;
- требование по размещению котла в котельной — отдельном помещении, оборудованном системой подачи воздуха для обеспечения процессов горения;
- необходимость устройства дымоходов;
- большие затраты на доставку, складирование, хранение твердого топлива;
- ограниченность возможности автоматизации процессов загрузки топлива в тепловой генератор, удаления золы;
- сложности управления мощностью работы твердотопливного котла и поддержания стабильной температуры внутри помещения;
- хранение и эксплуатация систем на твердом топливе связаны с наличием грязи и пыли в котельной и помещениях хранения топлива.

Недостатки значительные и их много, но применение твердого топлива для отопления индивидуальных домов в ряде регионов РФ оправдано невозможностью использования других видов топлива и цивилизационной (исторической) технологической инерционностью, поэтому оно будет применяться еще несколько десятилетий.

Удовлетворение современных потребностей жителей индивидуальных домов, связанных с частичной или полной ликвидацией недостатков систем теплоснабжения на твердом топливе, возможно с помощью гибридных систем теплоснабжения.

¹ Национальное достояние номер 2: кто в России без дров не выживет. URL: <https://newizv.ru/news/2023-11-08/natsionalnoe-dostoyanie-nomer-2-kto-v-rossii-bez-drov-ne-vyzhivet-423032>

² Литвинчук Г.Г. Отчет 2023. Отопительные котлы (Boilers), газовые, жидкотопливные, твердотопливные, электрические (до 100 кВт). URL: <https://litvinchuk.ru/gotovye-marketingovye-issledovaniya>

Под гибридной системой теплоснабжения индивидуального дома понимаются системы с применением нескольких видов энергии для получения тепловой энергии, используемой для отопления помещений и подготовки горячей воды. Данные системы имеют в своем составе два или более тепловых генераторов, как правило, основной и вспомогательный, работа которых компенсирует недостатки использования теплового генератора на одном виде топлива. Предлагается рассмотреть схему теплоснабжения индивидуального дома с основным тепловым генератором на твердом топливе и дополнительным (резервным) на электрической энергии. В момент нахождения жильцов в доме происходит использование теплового генератора на твердом топливе. В ночное время, когда применение электрической энергии минимальное, а также в период отсутствия в помещении жильцов, происходит подключение электрического водяного теплового генератора, обеспечивающего удаленный контроль температурного состояния дома, в том числе с исключением переохлаждения инженерных систем дома и возможностью удаленного управления температурным режимом с целью подготовки помещения для проживания жильцов из режима ожидания и минимизации затрат энергии в комфортное. Одним из главных вопросов при корректном определении экономических затрат при использовании твердотопливных тепловых генераторов является принимаемый в расчетах коэффициент энергетической эффективности. Показатели энергетической эффективности твердотопливных котлов, указанные в инструкциях по эксплуатации от производителя, представляются для лабораторных условий и идеального топлива. В реальности тепловая энергия, произведенная твердотопливным тепловым генератором, зависит от многих факторов: сорта, породы древесины, размера фракции угля, влажности, режимов горения, конструкции и материалов изготовления камер сгорания. Для атмосферных напольных котлов небольшой мощности (до 50 кВт) без автоматической подачи топлива и регулировки тяги коэффициент полезного действия теплового генератора на твердом топливе не превышает 50–65 %³ [5]. В отчетах Еврокомиссии по оценке эффективности твердотопливных котлов систем теплоснабжения домохозяйств заявлено, что конструкции напольных котлов на дровах на топливе с ручной загрузкой топлива без автоматического регулирования подачи воздуха и без теплового аккумулятора (буферной емкости) имеют средний за отопительный период коэффициент энергетической эффективности 41,4 % [4].

При использовании традиционных твердотопливных котлов практически невозможно ор-

ганизовать автоматизированную работу системы отопления без включения в отопительный контур буферной емкости. По правилам расчета объемов буферных емкостей 30–50 л на 1 кВт·ч номинальной мощности котла при номинальной мощности котла 20 кВт·ч объем буферной емкости должен составлять до 1000 л⁴. Стоимость такой емкости без монтажа — более 80 000 рублей⁵.

Использование системы теплоснабжения индивидуального дома без буферной емкости снижает коэффициент энергетической эффективности твердотопливных тепловых генераторов от заявленных производителями на величину до 20–25 %⁶. Это обусловлено тем, что большую часть времени отапливаемого периода теплотери дома составляют 15–40 % от номинальной мощности. Без буферной емкости, назначение которой состоит в сглаживании разницы тепловой мощности котла и теплопотерь дома, работа твердотопливного котла неэффективна. Установка буферной емкости может экономить до 30 % топлива.

В настоящее время появилось достаточно много идей по повышению энергоэффективности твердотопливных тепловых генераторов и автоматизации процесса загрузки топлива в камеру горения. Применяются разные варианты видов ископаемого топлива (каменный уголь, бурый уголь, антрацит, горючие сланцы, сапропель) и биомассы (различные сорта древесины, топливные брикеты, пеллеты, торф, опилки, щепа, зерновые и сельскохозяйственные отходы) [6–10]. Проблема заключается в том, что производство альтернативного дровам или углю твердого топлива в России организовано слабо, а цена высокая. Стоимость тепловых генераторов с автоматизацией подачи топлива в топку и их сервисное обслуживание значительно выше традиционных тепловых твердотопливных генераторов. Основная доля потребительского рынка России приходится на атмосферные твердотопливные дровяные котлы с естественной тягой и отсутствием автоматического регулирования подачи воздуха. Также широкое распространение получили пиролизные котлы, имеющие более высокий коэффициент энергетической эффективности.

Цель исследования — описание работы гибридной системы теплоснабжения индивидуального дома с основным тепловым генератором на твердом топливе и дополнительным электрическим водяным

⁴ Как рассчитать объем буферной емкости системы отопления. URL: <https://nvsk.net/articles/kak-rasschitat-obem-bufernoj-emkosti/?srsltid=AfmBOopWUGK6-uWW0-PYw612F7CKXONw1JBEOOLxklRMzr9vziukLY->

⁵ Теплоаккумулятор TA Classic 1000. URL: <https://www.ozon.ru/product/teploakkumulyator-ta-classic-1000-2022153223>

⁶ Отопление твердотопливным котлом с баком — аккумулятором тепла. URL: <https://domekonom.su/tverdotoplivnyi-kotel-v-zakrytoi-sisteme.html>

³ Solid Fuel Boilers. URL: https://energy-efficient-products.ec.europa.eu/product-list/solid-fuel-boilers_en

тепловым генератором резистентного типа; определение энергетической эффективности системы автоматического переключения режимов работы тепловых генераторов и экономический анализ затрат на эксплуатацию гибридных систем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования коэффициентов энергетической эффективности проводились на испытательном стенде завода «АРДЕРИЯ» с электрическим тепловым генератором Ардерия ЕС 12⁷. Натурные испытания тепловых потерь атмосферных дровяных котлов в режиме ожидания выполнялись в Московской области на реальном объекте, оснащенном дровяным пиролизным котлом Rojek КТР20 с номинальной мощностью 20 кВт, минимальной мощностью 12 кВт. Декларируемый производителем коэффициент энергетической эффективности — 85,1 %, индекс энергоэффективности (EEI) — 79, вес котла — 261 кг⁸. Испытания теплопотерь осуществлялись по три раза на трех скоростях работы циркуляционного насоса при отключении контура отопительных приборов дома. Расчет тепловыделений твердотопливного котла в режиме ожидания без процесса горения топлива проводился косвенным методом исходя из уравнения теплового баланса. Замерялись температура в помещении котельной, атмосферная температура воздуха, температуры теплоносителя на входе и выходе котла, температуры воздуха в дымовой трубе и в поддувале. Значения температур фиксировались с помощью шестиканального регистратора Data Logger AJAT, цифровых датчиков температуры DS18B20 (–55...+125 °С), расход теплоносителя (вода) определялся счетчиком воды OVG-25 ($Q_{\max}$ 3,5 м³/ч, кл. В-Н/AV).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гибридная схема работы системы теплоснабжения

На рис. 1 представлена гибридная схема теплоснабжения индивидуального дома. На схеме два тепловых генератора: 1 — твердотопливный котел, 2 — электрический котел, указаны тепловые приборы в виде радиаторов отопления и «теплого пола». Подготовка горячей воды происходит через бойлер косвенного нагрева. При основном режиме работы нагрев теплоносителя осуществляется в основном котле на твердом топливе. Движение теплоносителя в контуре генерации тепловой энергии показано на рис. 1 цифрой I. Контур отделен от контура потребления тепловой энергии II буферной емкостью.

⁷ ARDERIA. Настенный электрический котел. URL: https://arderia.ru/assets/Serviscentry/Руководство%20эл.котлы%20Arderia%20EC12_15%20от%2006.11.25.pdf

⁸ Водогрейный котел КТР 20. URL: <http://www.rojek.ru/ktp-20/>

В дополнительном (резервном) режиме работы генерация тепловой энергии происходит в электрическом котле. Движение теплоносителя производится по контуру III, объединяющему контур генерации и контур потребления тепловой энергии. Необходимо отметить, что при режиме работы с электрическим котлом контур основного котла отключен с помощью шаровых кранов с электроприводом, циркуляционный насос контура основного котла отключен. Данное решение позволяет увеличить энергетическую эффективность гибридных схем теплоснабжения за счет исключения тепловых потерь на основном котле.

При работе в дополнительном режиме с генерацией тепловой энергии электрическим котлом происходит отключение контура циркуляции I, сигнал на отключение подается контроллером управления работой электрического котла. Переключение распределения потоков осуществляется с помощью шаровых кранов 6, 10 при условии, что температура в контуре основного котла не превышает 30 °С. По окончании вспомогательного режима работы с использованием электрического котла система автоматически возвращается в исходное состояние работы от твердотопливного котла. Все дополнительные режимы в виде удаленного управления, ночной режим, поддержание заданной температуры и исключение переохлаждения системы в периоды отсутствия жильцов выполняются при использовании электрического котла. На рис. 2 показан резервный электрический котел для гибридных систем индивидуального теплоснабжения Ардерия ЕС12 с проточной камерой нагрева теплоносителя, симисторным управлением тепловой мощностью котла в диапазоне 2–12 кВт·ч, возможностью программирования графика функционирования по недельному циклу и дистанционного управления работой котла, получения информации о состоянии котлов и температурного режима в помещении.

Энергетическая эффективность тепловых генераторов гибридных схем теплоснабжения

Коэффициент энергетической эффективности электрических тепловых генераторов высокий и составляет 0,93–0,985 % [11]. В системах теплоснабжения в подавляющем большинстве применяются электрические генераторы с резистентным (джоулевым) нагревом. Практика последних лет продемонстрировала надежность нагревательных электрических блоков косвенного поверхностного нагрева проточного типа [12, 13]. В отличие от камер нагрева теплоносителя объемного типа в них многократно снижены условия возникновения накипи на электрических нагревательных элементах, результат — надежность и срок службы тепловых агрегатов. С учетом теплопотерь всех элементов систем теплоснабжения, эффективности работы отопительных приборов средний коэффициент энергетической эффективности за весь отопительный период

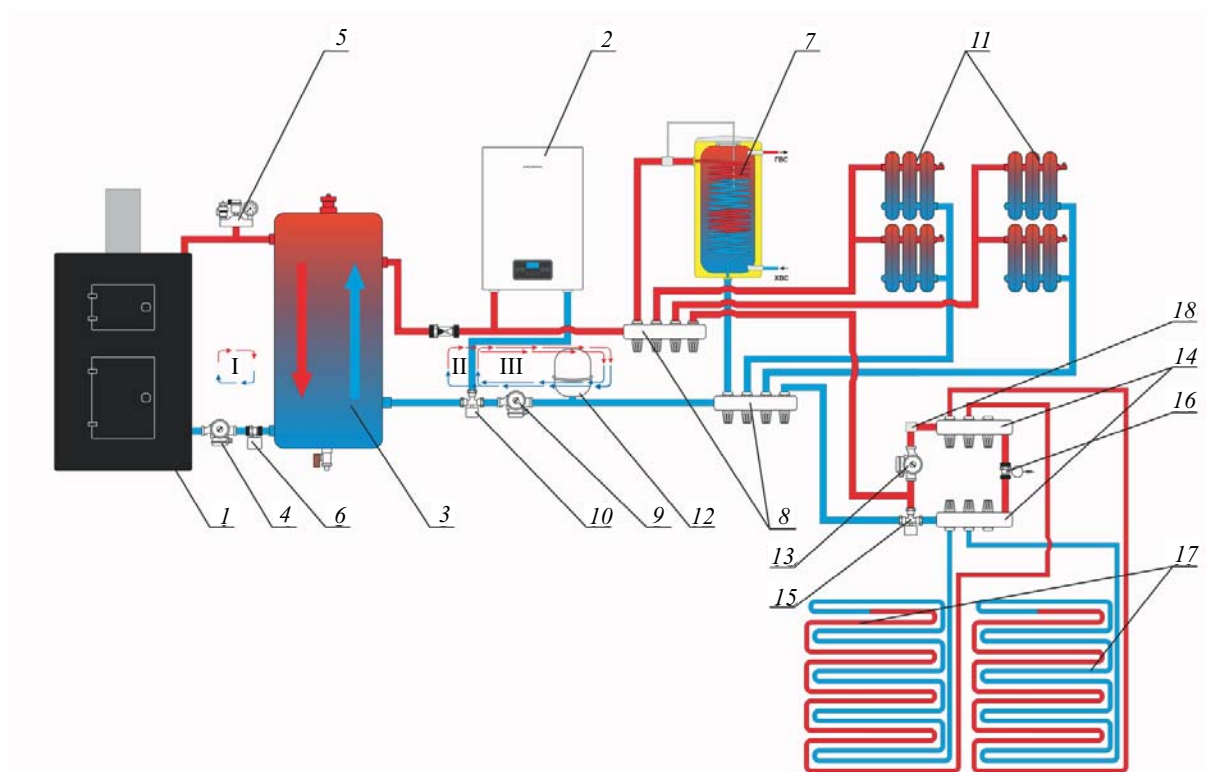


Рис. 1. Гибридная гидравлическая схема теплоснабжения индивидуального дома с твердотопливным и электрическим тепловыми генераторами: 1 — твердотопливный котел; 2 — электрический котел; 3 — буферная емкость; 4 — циркуляционный котел контура твердотопливного котла; 5 — группа безопасности твердотопливного котла; 6 — шаровой двухпозиционный кран с электроприводом; 7 — бойлер косвенного нагрева; 8 — распределительные коллекторы контура потребления энергии; 9 — циркуляционный насос контура потребления энергии; 10 — трехходовой шаровой кран с электроприводом; 11 — радиаторы отопления; 12 — расширительный бак; 13 — циркуляционный насос контура «теплый пол»; 14 — коллекторы «теплого пола»; 15 — термосмеситель; 16 — обратный клапан с ограничителем давления; 17 — «теплый пол»; 18 — термопара контура «теплый пол»; I — контур генерации тепловой энергии твердотопливным котлом; II — контура потребления тепловой энергии; III — контур потребления тепловой энергии со встроенным электрическим котлом

Fig. 1. Hybrid hydraulic heating system for a detached house with solid fuel and electric heat generators: 1 — solid fuel boiler; 2 — electric boiler; 3 — buffer tank; 4 — circulation boiler of the solid fuel boiler circuit; 5 — solid fuel boiler safety group; 6 — two-position ball valve with electric drive; 7 — indirect heating boiler; 8 — distribution manifolds of the energy consumption circuit; 9 — circulation pump of the energy consumption circuit; 10 — three-way ball valve with electric drive; 11 — heating radiators; 12 — expansion tank; 13 — circulation pump of the “warm floor” circuit; 14 — collectors of the “warm floor”; 15 — thermal mixer; 16 — check valve with pressure limiter; 17 — “warm floor”; 18 — thermocouple of the “warm floor” circuit; I — circuit of heat generation by a solid fuel boiler; II — circuit of heat consumption; III — circuit of heat consumption with built-in electric boiler

для систем с электрическим тепловым генератором в дальнейших расчетах принимается равным 0,9 для систем с камерой нагрева объемного типа и 0,93 с камерой нагрева проточного типа. Следует отметить простоту управления мощностью электрического теплового генератора в широком диапазоне регулирования и незначительную зависимость коэффициентов энергетической эффективности от мощности теплового генератора. При оценке коэффициентов энергетической эффективности твердотопливных котлов возникают проблемы с определением теплофизических характеристик топлива. Для атмосферных напольных дровяных котлов не-

большой мощности (до 50 кВт) без автоматической подачи топлива и регулировки тяги коэффициент полезного действия теплового генератора на твердом топливе не превышает 45–55 %, наибольший (54,13 %) получен для березовых поленьев, наименьший — для сосны (45,13 %) [14, 15]. Эффективность сжигания топлива в немеханизированных котлах малой мощности в большей мере зависит от профессиональных качеств людей, эксплуатирующих твердотопливные котлы. В табл. 1 представлены данные по теплоте сгорания дров разных пород дерева. Даже при рассмотрении одинакового показателя влажности, равного 20 %, зна-



Рис. 2. Электрический котел Ардерия EC12 для гибридных индивидуальных систем теплоснабжения
Fig. 2. Electric boiler Arderia EC 12 for hybrid individual heating systems

Табл. 1. Технические и экономические показатели колотых дров
Table 1. Technical and economic indicators of chopped firewood

Порода дерева Wood species	Теплота сгорания, 20 % влажность, кВт/м³ Calorific value, 20 % humidity, kW/m³	Стоимость колотых дров, 20 % влажность, руб/м³ Cost of chopped firewood, 20 % humidity content, rub/m³	Логистика складирования, руб/м³ Warehousing logistics, rub/m³
Береза Birch Дуб Oak Клен Maple Лиственница Larch	1620–2610 1790–2820 1750–2650 1260–2570	2000–4000 3600–5000 3000–4500 3000–4500	Доставка Delivery 300–500 Укладка Packing 500
Сосна Pine Ольха Alder	1490–2480 1300–2030	1800–2500 2500–4000	
Ель Spruce Осина Aspen Тополь Poplar	1240–2300 1170–2010 980–1590	1500–2000 2300–3500 2000–3500	

чения теплоты сгорания могут отличаться до 50 % в зависимости от размеров, формы дров, наличия коры и возраста древесины⁹ [16–18].

Влажность свежесрубленного дерева составляет 100 %, и естественная сушка на открытом воздухе доводит влажность до 20 % в течение года. Кроме разбросов в значениях теплоты сгорания твердого топлива, существует зависимость коэффициентов энергетической эффективности от степени загрузки камеры сгорания, степени прогорания, состояния поверхности и наличия сажи на стенках камеры сгорания и дымоходах, величины влажности и температуры подаваемого в камеру воздуха, необходимого для горения.

Вопросы энергетической эффективности работы твердотопливных котлов освещены в исследованиях [19–23], на основании которых можно сделать вывод о значительно более низкой средней энергетической эффективности в отопительный период времени года. С учетом теплопотерь в системе отопления, связанных с работой тепловых приборов, наличия потерь на трубопроводах вне отапливаемых помещений в дальнейшем в расчетах принято значение коэффициента энергетической эффективности преобразования твердотопливного атмосферного котла (топливо — дрова) без автоматической регулировки подачи воздуха, равное 0,45.

Достаточно широкое распространение также получили пиролизные котлы с ручной подачей топлива. Время горения на одной закладке дров составляет до 10 ч при более высоком коэффициенте полезного действия, что снижает объем дров, необходимый для отопительного периода¹⁰ [24, 25]. Но пиролизные котлы с ручной подачей топлива обладают рядом существенных недостатков:

- более высокой стоимостью по сравнению с традиционными атмосферными котлами;
- высокими требованиями к качеству влажности дров (требуется влажность 20 %);
- не работают на малой мощности (минимальная мощность 60 % от номинальной);
- не работают на низких рабочих температурах в системе теплоснабжения из-за возможности выпадения конденсата;
- отсутствием возможности регулирования тепловой мощностью котла или решением данного вопроса с наличием дополнительной тепловой аккумулирующей емкости объемом не менее 800 л.

Как при использовании традиционных атмосферных твердотопливных котлов, низкая стоимость топлива и отсутствие затрат на разрешение на установку при более высоком КПД сохраняют

перспективы применения данных устройств в ряде регионов России на многие годы. В расчетах средней энергетической эффективности в отопительный период времени года при реальных характеристиках используемого топлива всей системы теплоснабжения на базе пиролизного основного теплового генератора (топливо — дрова) принимается коэффициент энергетической эффективности, равный 0,60. Необходимо отметить, что все виды тепловых генераторов на твердом топливе независимо от типа топлива обладают серьезным недостатком — низким диапазоном регулирования мощности. Большинство исследований коэффициентов энергетической эффективности твердотопливных котлов, представленных в руководствах по эксплуатации и технических паспортах, указываются для установившихся режимов горения топлива в лабораторных условиях при использовании лабораторного топлива с низкой влажностью (принудительная сушка). В реальной эксплуатации котлов нужно учитывать средние показатели температуры отопительного периода времени года и режимы функционирования котельного агрегата, связанные с работой при низких тепловых нагрузках (режимы «тактования» работы теплового генератора), которые значительно отличаются от показателей при лабораторных испытаниях и лабораторном топливе. Кроме того, все твердотопливные котлы работают в реальных условиях с многократным избытком тепловой мощности и применение их без дополнительных устройств в виде тепловых аккумуляторов приводит к снижению коэффициента энергетической эффективности на величину до 25 % [7]. Средний сезонный коэффициент энергетической эффективности даже при наличии в системе достаточно дорогих и объемных тепловых генераторов в реальности также значительно отличается от декларируемых показателей производителей. Масштабные исследования, выполненные для пеллетных котлов с тепловыми генераторами и без них для реальных климатических условий с реальными пеллетами в соотношении 80 % лиственных пород дерева первой категории и 20 % хвойных пород (сосна), показали, что для пеллетных котлов с номинальной мощностью 25 кВт·ч при декларируемых коэффициентах энергетической эффективности по паспортным данным 0,93 максимальный сезонный коэффициент системы с тепловым аккумулятором составил 0,74, а без теплового аккумулятора 0,56 [7].

Экономическая оценка стоимости топлива для работы гибридных систем теплоснабжения

С целью оценки стоимости топлива при обогреве индивидуального дома необходимо знать средние теплопотери дома и продолжительность отопительного периода времени. Основная формула для расчета теплопотерь через ограждающие конструкции дома:

$$Q = S \cdot (\Delta T/R), \quad (1)$$

⁹ Инженерный справочник DPVA. URL: <https://dpva.ru/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/CombustionEnergy/WoodWetDryCombustion>

¹⁰ Котлы с пиролизным сжиганием топлива. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/kotly-s-piroliznym-szhiganiem-topliva>

где Q — теплотери, Вт; S — площадь конструкции, м²; ΔT — разница температур внутри/снаружи, °C; R — коэффициент сопротивления теплопередаче, м²·°C/Вт.

Для конструкций, состоящих из нескольких материалов, общее термическое сопротивление является суммой сопротивлений каждого слоя. Суммарные теплотери складываются из теплотерь всех ограждающих конструкций, методика расчета представлена в публикации [26]. В расчете суммарных тепловых потерь за отопительный период и оценке экономических затрат необходимо в формуле (1) брать разницу средних температур в отопительный период и температуру в помещении. Так, к примеру, в Московской области средняя температура воздуха со средней суточной температурой воздуха ≤ 10 °C составляет $-0,8$ °C¹¹. При рекомендованной температуре внутри жилого помещения 20 °C при площади 110 м² — средней площади индивидуальных домов в России (по данным ДОМ РФ)¹², рекомендуемом среднем коэффициенте сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции 3,2 м²·°C/Вт¹³, теплотери составляют около 3 кВт·ч. Соответственно, при коэффициенте энергетической эффективности 0,45 для традиционных атмосферных котлов при использовании дров лиственных пород при теплоте сгорания 2000 кВт/м³ в месяц при ежедневном круглосуточном обогреве потребляется 2,4 м³ дров, что при учете стоимости колотых, доставленных на объект и уложенных в штабель дров составляет 9,1 тыс. руб. При использовании электрической энергии по среднему тарифу для сельской местности, равному 4,72 руб. за кВт¹², стоимость отопления с помощью электрического котла составляет при аналогичных условиях 10,96 тыс. руб.

Энергетическая эффективность работы гибридных схем теплоснабжения

В разделе «Энергетическая эффективность тепловых генераторов гибридных схем теплоснабжения» описаны коэффициенты энергетической эффективности схем работы в варианте использования твердотопливного и электрического тепловых генераторов. При применении гибридной схемы в варианте электрического теплового генератора твердотопливный тепловой генератор выступает в виде негативной тепловой нагрузки, поскольку теплообменники атмосферных твердотопливных котлов в период ожидания без горения топлива охлаждаются движением воздуха естественной тяги дымоходов. Для исключения статических (дополнительных тепловых потерь

на теплообменнике твердотопливного котла) в контурах циркуляции гибридных схем теплоснабжения предусмотрены отключения движения потоков теплоносителя через теплообменник котла с помощью шаровых кранов с электроприводом (см. рис. 1). Статические тепловые потери твердотопливных котлов малой мощности составляют до 3–5 % от номинальной мощности котла¹⁴. Но, учитывая, что твердотопливные котлы малой мощности работают со значительным переизбытком мощности и слабо поддаются регулированию, а также то, что реальные тепловые потери индивидуальных домов с отапливаемой площадью 70–100 м² в среднем по году составляют 3 кВт·ч, при температуре атмосферного воздуха выше 5 °C применение твердотопливных котлов с экономической точки зрения становится нецелесообразным. Котлы работают с 10-кратным переизбытком тепловой мощности.

Величину тепловых потерь твердотопливного котла в режиме ожидания без горения топлива через дымовую трубу предлагается определить косвенным методом их уравнения теплового баланса:

$$Q_3 = Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}} + Q_{\text{д}}, \quad (2)$$

где Q_3 , Вт — экспериментальные значения суммарных тепловых потерь, рассчитанные по формуле:

$$Q_3 = C \cdot M \cdot (T_1 - T_2), \quad (3)$$

где C — теплоемкость воды 4,2 кДж/(кг·°C); M — масса воды, перекачиваемая насосом за единицу времени, кг; T_1 — температура теплоносителя на входе в котел, °C; T_2 — температура теплоносителя на выходе из котла, °C;

$Q_{\text{л}}$ — тепловой поток излучения от котла в помещение котельной на основании закона Стефана – Больцмана:

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T^4), \quad (4)$$

где $Q_{\text{л}}$ — тепловой поток излучением, Вт; ε — излучающая способность котла, принятая 0,8; σ — постоянная Стефана – Больцмана ($5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·K)); A — площадь поверхности котла, м²; T_1 — температура теплоносителя, K; T — температура в помещении котельной, K;

$Q_{\text{к}}$ — конвективный нагрев от поверхности котла в котельную определяется по формуле:

$$Q_{\text{к}} = \alpha \cdot A \cdot (T_1 - T), \quad (5)$$

где $Q_{\text{к}}$ — количество теплоты, Вт; α — коэффициент конвективного теплообмена при естественной конвекции принят равным в расчетах 25,0 Вт/(м²·°C); A — площадь поверхности радиатора, м²; T_1 — температура теплоносителя, °C; T — температура в помещении котельной, °C;

¹¹ Строительная климатология — Московская область, Москва. URL: <https://msk.vo-da.ru/tool/cp-info>

¹² Новые тарифы на электроэнергию в 2025 году: как изменится плата для россиян? URL: <https://www.ingos.ru/company/blog/2024/novye-tarify-na-elektroenergiyu-2025>

¹³ СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/08a/4294844886.pdf>

¹⁴ Тепловой баланс котла. URL: https://www.s-vfu.ru/universitet/rukovodstvo-i-struktura/instituty/iti/erasmus_all/LPEB/Б1.В.ОД.6.4.Тема%205.pdf

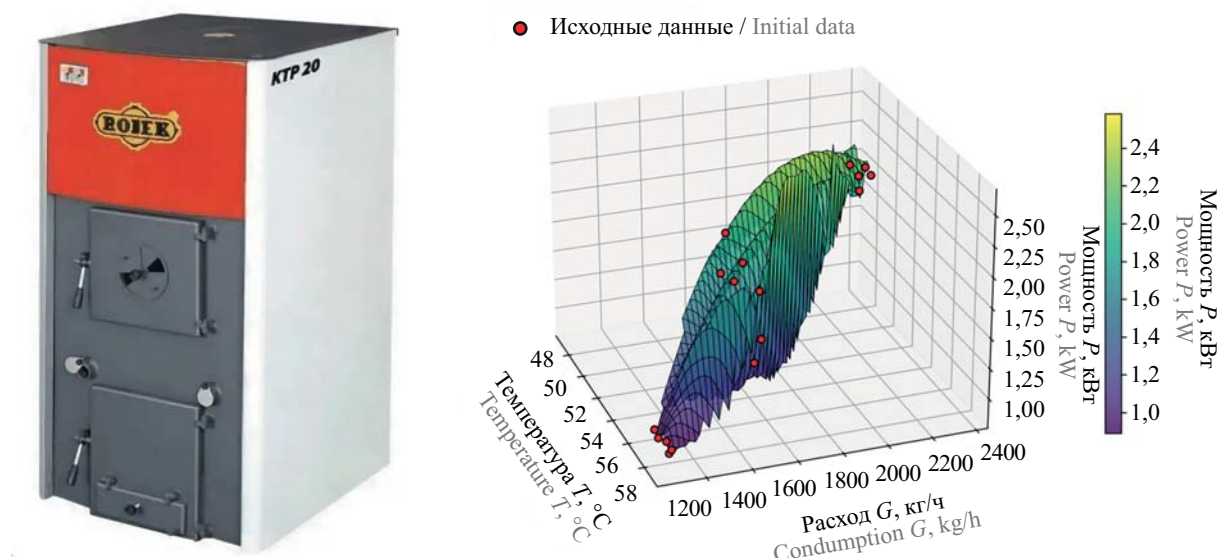


Рис. 3. Внешний вид котла и экспериментальные графики статических тепловых потерь в режиме ожидания работы
Fig. 3. External appearance of the boiler and experimental graphs of static heat losses in standby mode

Q_d — тепловые потери через дымовую трубу при естественной тяге дымоходов твердотопливного котла без горения топлива, Вт.

Экспериментальные исследования, проведенные на атмосферных твердотопливных котлах (марки), показали, что средние потери твердотопливных указанных котлов в режиме ожидания — 0,8–2,0 кВт·ч, что составляет до 100 % от тепловых потерь индивидуального дома при температурах атмосферы выше +5 °С. Графики тепловых потерь через теплообменник твердотопливного котла в период ожидания работы и внешний вид твердотопливного пиролизного котла представлены на рис. 3.

Тепловые потери атмосферных твердотопливных котлов небольшой мощности, применяемые в индивидуальном строительстве, в режиме ожидания без процессов горения при циркуляции теплоносителя контура системы теплоснабжения через их теплообменник при температуре теплоносителя 60 °С составляют до 2 кВт·ч. Учитывая, что в большинстве случаев индивидуального строительства в России в качестве отопительных приборов применяются радиаторы отопления, эффективно работающие при температуре более 50 °С, значения тепловых потерь твердотопливных котлов, состоящих в режиме ожидания без горения топлива, через дымовую трубу соизмеримы с тепловыми потерями всего дома при средних температурах атмосферы воздуха за отопительный период. Из опыта использования средний расход теплоносителя систем отопления с циркуляционными насосами с мокрым ротором, применяемых в индивидуальном строительстве, составляет около 1 м³/ч. При применении отопительных приборов радиаторного типа с температурой подачи теплоносителя 60 °С паразитные тепловые потери на теплообменнике твердо-

топливного котла с атмосферной естественной тягой без горения топлива составляют 1,2 кВт/ч.

На основании указанного выше можно сделать выводы, что установка электрических нагревательных элементов в корпус теплообменника, применяемая в ряде конструкций твердотопливных атмосферных котлов для работы на электрический обогрев при отсутствии горения твердого топлива, не имеет смысла, поскольку основная доля энергии электрического нагрева через дымоход выходит в атмосферу. Контур циркуляции твердотопливного котла в период работы электрического теплового генератора должен быть отключен. Целесообразным также является исключение движения теплоносителя через электрический тепловой генератор при функционировании твердотопливного котла в режиме основной работы. Электрические тепловые генераторы обладают гидравлическим сопротивлением, и движение потоков через них создает дополнительные вопросы по регулировке приборов отопления и способствует увеличению рисков возникновения накипи в каналах электрического прибора.

Углеродоемкость теплоснабжения при использовании гибридных схем

В ходе оценки уровня углеродоемкости (эмиссии CO₂) при работе гибридного варианта теплоснабжения первоначально рассмотрим величины эмиссии парниковых газов, связанные с процессом горения твердого топлива и производства электрической энергии. Необходимо отметить, что величина эмиссии CO₂ должна быть приведена к тепловой энергии конечного прибора отопления с учетом всей цепочки (цикла реализации топлива в тепловую энергию конечного потребления — нагрева воздуха в помещении). Электрическая энергия про-

Табл. 2. Эмиссия CO₂ при производстве тепловой энергии индивидуальных систем теплоснабжения без буферных емкостей для тепловых генераторов с использованием разного вида топлива

Table 2. CO₂ emissions during heat production of individual heat supply systems without buffer tanks for heat generators using different types of fuel

Вид топлива Fuel type	Электричество Electricity	Дрова (традиционные котлы) Firewood (traditional boilers)	Дрова (пиролизные котлы) Firewood (pyrolysis boilers)	Пеллеты (лиственный уголь) Pellets (deciduous coal)	Уголь Coal
CO ₂ , г/1 кВт·ч gram/1 kWh	420	1150	820	710	1100

изводится различными способами с применением разных видов первичного топлива: путем сжигания углеводородного топлива, с использованием гидроэлектростанций, атомной энергии, возобновляемых источников энергии. Выбросы CO₂, связанные с производством электроэнергии, различаются по странам в зависимости от исторически сложившихся технологий, энергетических ресурсов, принятых стратегий развития производства электрической энергии, политических решений. В процессе расчета суммарной углеродоемкости теплоснабжения при использовании электрических тепловых генераторов необходимо учитывать потери на транспортировку электрической энергии и энергетическую эффективность ее преобразования в тепловую. Уровень потерь при транспортировке электрической энергии принят равным 10 % [27], суммарный коэффициент энергетической эффективности автономной системы теплоснабжения с электрическим теплогенератором 0,9. Средний уровень эмиссии CO₂ в России при производстве электроэнергии составляет около 350 г CO₂/кВт·ч [28].

При расчетах систем теплоснабжения с использованием твердотопливных тепловых генераторов следует учитывать большой разброс теплотворной способности разных видов топлива, эффективности работы системы. В сравнении приняты средние значения теплотворной способности колотых дров лиственных пород дерева с влажностью 20 %, суммарным коэффициентом энергетической эффективности для атмосферных напольных дровяных котлов с ручной подачей топлива без автоматической регулировки тяги воздуха, равным 0,45, пиролизных атмосферных котлов с ручной подачей топлива, равным 0,60. Котлы на угольном топливе при расчете углеродоемкости теплоснабжения имеют средний коэффициент полезного действия 0,5. При сжигании 1 кг угля выделяется 2,1–2,7 кг CO₂ и от 4 до 8,5 кВт·ч тепловой энергии в зависимости от технических параметров сырья. Если рассматривать пеллеты лиственных пород дерева, то при их сжигании выделяется 1,4–1,75 кг CO₂ и 4,5 кВт·ч тепловой энергии [29]. Коэффициент энергетической эффективности для пеллетных котлов в системах теплоснабжения без буферных емкостей, усредненный для отопительного периода,

на основании данных, представленных в работе [29], принят равным 0,6. Для учета увеличения выбросов CO₂ в периоды циклической работы тепловых генераторов на твердом топливе целесообразно для оценки эмиссии CO₂ всего отопительного периода времени года ввести поправочный коэффициент 1,3. Значения углеродоемкости при производстве тепловой энергии в конечной точке потребления — отопительных приборах индивидуального дома при использовании различных тепловых генераторов без применения тепловых генераторов в системе теплоснабжения представлены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ряде регионов Российской Федерации применение твердотопливных котлов для систем теплоснабжения индивидуальных домов оправдано невозможностью использования других видов топлива и цивилизационной (исторической) технологической инерционностью, поэтому они будут использоваться еще несколько десятилетий.

В связи с более высокими темпами роста цен на колотые дрова по сравнению с ростом тарифов на электроэнергию затраты на твердое топливо и электрическую энергию для производства тепловой энергии в индивидуальных системах теплоснабжения стали соизмеримыми. При новом строительстве индивидуальных домов целесообразно рассматривать вопрос теплоснабжения с применением только электрического теплового нагревателя.

Гибридные схемы теплоснабжения индивидуальных домов при использовании твердотопливного котла, как основного теплового генератора, и электрического котла, как резервного, решают вопрос комфортного теплоснабжения с возможностью удаленного управления работой системы в период отсутствия жильцов или в ночное время.

С целью сокращения экономических затрат при эксплуатации гибридных схем теплоснабжения целесообразно применять схемы с автоматическим перераспределением потоков теплоносителя при работе в основном и резервном режимах.

Углеродоемкость производства 1 кВт тепловой энергии в час в конечной точке потребления (отопительные приборы дома) для территории РФ

при применении электрической энергии ниже любого варианта с использованием твердого топлива.

С экономической и экологической точек зрения применение твердотопливных котлов для теплоснабжения индивидуальных домов при темпера-

турах атмосферного воздуха выше +5 °С не имеет смысла. Стоимость твердого топлива для обеспечения комфортных условий жизни выше варианта отопления с использованием электрической энергии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Слободчиков Е.Г. Из опыта эксплуатации твердотопливных котлов в условиях центральной Якутии // Современное строительство и архитектура. 2021. № 4 (24). С. 21–24. DOI: 10.18454/mca.2021.24.3. EDN DNVAQZ.
2. Иванов В.Н. Энергоэффективность теплогенераторов малой мощности в условиях Крайнего Севера : учебное пособие. Якутск : Издательский дом СВФУ, 2019. 81 с.
3. Хаванов П.А. Источники теплоты автономных систем теплоснабжения : монография. М. : МГСУ, 2014. 208 с. EDN UGOSAL.
4. Богомолов А.Р., Анферов Б.А., Темникова Е.Ю., Латин А.А. Анализ эффективности работы котельного агрегата «CARBOROBOT-40» // Ползуновский вестник. 2015. № 4–1. С. 61–67. EDN VMDKSF.
5. Pelka G., Luboń W., Pachytel P. Analysis of the efficiency of a solid fuel boiler depending on the choice of combusted fuel // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 154. P. 02003. DOI: 10.1051/e3sconf/202015402003. EDN RDEORN.
6. Петринчик В.А., Царев А.С. Проблемы использования топливных брикетов в коммунальной теплоэнергетике малых населенных пунктов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2014. № 3 (339). С. 139–144. EDN QIYXLB.
7. Жадина Н.В. Сравнительный анализ эколого-экономической эффективности альтернативных видов топлива на основе древесного сырья // Вестник Забайкальского государственного университета. 2016. Т. 22. № 8. С. 88–95. DOI: 10.21209/2227-9245-2016-22-8-88-95. EDN WMFFIH.
8. Судакова И.Г., Руденко Н.Б. Получение твердых биотоплив из растительных отходов : обзор // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2015. Т. 8. № 4. С. 499–513. DOI: 10.17516/1998-2836-2015-8-4-499-513. EDN VOABJT.
9. Николаева Л.А., Попов С.Н., Буренина О.Н., Соловьев Т.М. Утилизация отходов деревоперерабатывающих предприятий Республики Саха (Якутия) в топливные брикеты // Интернет-журнал Научное ведение. 2017. Т. 9. № 6. С. 56. EDN YSAHSQ.
10. Дремичева Е.С., Эминов А.А. Эколого-экономические аспекты использования торфа в энергетике // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 1 (53). С. 96–108. EDN ZSBYLN.
11. Торопов А.Л., Саргсян С.В. Энергетическая эффективность электрических котлов автономных индивидуальных систем теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 7. С. 1104–1112. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1104-1112. EDN MONQBI.
12. Торопов А.Л. Классификация электрических котлов резистивного нагрева автономных водяных систем теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 10. С. 1608–1616. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1608-1616. EDN KJKTJJ.
13. Торопов А.Л. Энергетическая эффективность электрического котла с косвенным поверхностным резисторным нагревом теплоносителя // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 6. С. 927–934. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.927-934. EDN FIOIOF.
14. Pelka G., Wygoda M., Luboń W., Pachytel P., Jachimowski A., Paprocki M. et al. Analysis of the Efficiency of a Batch Boiler and Emissions of Harmful Substances during Combustion of Various Types of Wood // Energies. 2021. Vol. 14. Issue 20. P. 6783. DOI: 10.3390/en14206783. EDN CWVPPI.
15. Корнилова Н.В., Трубаев П.А. Теплотехнические испытания твердотопливных отопительных котлов малой мощности при сжигании брикетированных RDF-топлив // Энергетические системы. 2018. № 1. С. 224–233. EDN PNNKZH.
16. Максимук Ю.В., Пономарев Д.А., Курсевич В.Н., Фесько В.В. Теплота сгорания древесного топлива // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2017. № 4 (358). С. 116–129. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.116. EDN YZBFNV.
17. Пиур А.Э., Мелехов В.И., Кунтыш В.Б. Выбор древесного топлива для малой энергетики // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2014. № 1 (337). С. 101–108. EDN RWNTGR.
18. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине. М. : Лесная промышленность, 1989. 293 с.
19. Щеголев М.М., Гусев Ю.Л., Иванова М.С. Котельные установки : учебник для вузов. 2-е изд. М. : Стройиздат, 1972. 384 с.
20. Делягин Г.Н., Лебедев В.И., Пермяков Б.А., Хаванов П.А. Теплогенерирующие установки : учебник для вузов. 2-е изд. М. : ООО «ИД Бастет», 2010. 624 с.
21. Климов Г.М. Децентрализованные системы водяного отопления индивидуальных жилых зданий : учебно-методическое пособие. Нижний Новгород :

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2016. 52 с.

22. Мазурова О.К., Кузнецов Н.В., Бутенко А.Н. Автономное теплоснабжение : учебное пособие. Ростов-на-Дону : РГСУ, 2011. 143 с.

23. Зайцев О.Н., Степанцова Н.А., Циплина А., Эмирова Э., Кунский М. Теплообмен в газоходах жаротрубных водогрейных котлов при работе на твердом топливе // Строительство и техногенная безопасность. 2017. № 7 (59). С. 135–140. EDN ZWBTFM.

24. Барышева О.Б., Хабибуллин Ю.Х., Хасанова Г.Р. Эффективность применения разработанного твердотопливного котла длительного горения // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 1 (35). С. 123–127. EDN VUSKIH.

25. Андреев С.А., Загинайлов В.И., Воробьев В.А. Электротехнологический способ управления горением в пиролизных котлах // Вестник федерального государственного образовательного учреждения

высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2019. № 2 (90). С. 53–58. EDN ZDPQXJ.

26. Малявина Е.Г. Теплотери здания. М. : АВОК-Пресс, 2007. 141 с.

27. Шведов Г.В., Сипачева О.В., Савченко О.В. Потери электроэнергии при ее транспорте по электрическим сетям: расчет, анализ, нормирование и снижение. М. : Издательский дом «МЭИ», 2013. 424 с. EDN SUOPLV.

28. Гафуров А.М., Осипов Б.М., Гатина Р.З., Гафуров Н.М. Возможные пути снижения выбросов углекислого газа // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 9–10. С. 21–31. EDN YPSXTE.

29. Butcher T.A., Trojanowski R. Effect of Thermal Storage on the Emissions and Efficiency Performance of a Wood-Pellet-Fired Residential Boiler // ACS Omega. 2020. Vol. 5. Issue 44. Pp. 28517–28528. DOI: 10.1021/acsomega.0c03080. EDN VGSEHQ.

Поступила в редакцию 2 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 5 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 5 февраля 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: **Алексей Леонидович Торопов** — кандидат технических наук, генеральный директор — главный конструктор; **Инженерный центр «Апрель» (ИЦ «Апрель»)**; 105122, г. Москва, Щелковское шоссе, д. 13; РИНЦ ID: 1030472, Scopus: 58406665800, ORCID: 0000-0002-7457-6948; Toropov@aprilgroup.ru.

REFERENCES

1. Slobodchikov E.G. On the experience of operating solid fuel boiler in central Yakutia. *Modern Construction and Architecture*. 2021; 4(24):21-24. DOI: 10.18454/mca.2021.24.3. EDN DNVAQZ. (rus.).

2. Ivanov V.N. *Energy efficiency of low-power heat generators in the conditions of the Far North : textbook*. Yakutsk, Publishing House of SVFU, 2019; 81. (rus.).

3. Khavanov P.A. *Heat sources for autonomous heating systems : monograph*. Moscow, MGSU, 2014; 208. EDN UGOSAL. (rus.).

4. Bogomolov A.R., Anferov B.A., Temnikov E.Yu., Lapin A.A. Analysis of the efficiency of the boiler unit “CARBOROBOT-40”. *Polzunovsky Bulletin*. 2015; 4-1:61-67. EDN VMDKSF. (rus.).

5. Pełka G., Luboń W., Pachtyel P. Analysis of the efficiency of a solid fuel boiler depending on the choice of combusted fuel. *E3S Web of Conferences*. 2020; 154:02003. DOI: 10.1051/e3sconf/202015402003. EDN RDEORN.

6. Petrinchik V.A., Tsarev A.S. Use of biomass briquettes in the municipal heating system of small communities. *Russian Forestry Journal*. 2014; 3(339):139-144. EDN QIYXLB. (rus.).

7. Zhadina N. Ecological-economic efficiency of alternative fuels based on wood raw material: mmparanve analysis. *Transbaikal State University Journal*. 2016; 22(8):88-95. DOI: 10.21209/2227-9245-2016-22-8-88-95. EDN WMFFIH. (rus.).

8. Sudakova I.G., Rudenko N.B. Obtaining of solid biofuels from plant waste : review. *Journal Of Siberian Federal University. Chemistry*. 2015; 8(4):499-513. DOI: 10.17516/1998-2836-2015-8-4-499-513. EDN VOABJT. (rus.).

9. Nikolaeva L.A., Popov S.N., Burenina O.N., Solovov T.M. Waste utilization of woodworking enterprises of the republic of Sakha (Yakutia) into fuel briquettes. *The Eurasian Scientific Journal*. 2017; 9(6):56. EDN YSAHSQ. (rus.).

10. Dremicheva E., Eminov A. Environmental and economic aspects of the use of peat in the energy sector. *Bulletin of the Kazan State Power Engineering University*. 2022; 14(1):(53):96-108. EDN ZSBYLN. (rus.).

11. Toropov A.L., Sargsyan S.V. Energy efficiency of electric boilers of autonomous individual heat supply systems. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2025; 20(7):1104-1112.

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1104-1112. EDN MONQBI. (rus.).

12. Toropov A.L. Classification of electric resistive heating boilers for autonomous water heating systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(10):1608-1616. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1608-1616. EDN KJKTJJ. (rus.).

13. Toropov A.L. Energy efficiency of an electric boiler with indirect surface resistive heating of the heat carrier. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):927-934. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.927-934. EDN FIOIOF. (rus.).

14. Pełka G., Wygoda M., Luboń W., Pachytel P., Jachimowski A., Paprocki M. et al. Analysis of the Efficiency of a Batch Boiler and Emissions of Harmful Substances during Combustion of Various Types of Wood. *Energies*. 2021; 14(20):6783. DOI: 10.3390/en14206783. EDN CWVPPI.

15. Kornilova N.V., Trubaev P.A. Thermal tests of low-power solid-fuel heating boilers when burning briquetted RDF-fuels. *Energy System*. 2018; 1:224-233. EDN PNNKZH. (rus.).

16. Maksimuk Yu.V., Ponomarev D.A., Kursevich V.N., Fes'ko V.V. Calorific value of wood fuel. *Russian Forestry Journal*. 2017; 4(358):116-129. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.116. EDN YZBFNV. (rus.).

17. Piir A.E., Melekhov V.I., Kuntyshev V.B. Choice of wood fuel for small-scale power generation. *Russian Forestry Journal*. 2014; 1(337):101-108. EDN RWNTGR. (rus.).

18. Borovikov A.M., Ugolev B.N. *Wood reference book*. Moscow, Lesnaya Promyshlennost, 1989; 293. (rus.).

19. Shchegolev M.M., Gusev Yu.L., Ivanova M.S. *Boiler plants : textbook. 2nd ed.* Moscow, Stroyizdat, 1972; 384. (rus.).

20. Delyagin G.N., Lebedev V.I., Permyakov B.A., Khavanov P.A. *Heat generating installations : textbook. 2nd ed.* Moscow, ID Bastet LLC, 2010; 624. (rus.).

21. Klimov G.M. *Decentralized water heating systems for individual residential buildings : educational and methodological guide*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, EBS ASV, 2016; 52. (rus.).

22. Mazurova O.K., Kuznetsov N.V., Butenko A.N. *Autonomous heat supply : textbook*. Rostov-on-Don, RGSU, 2011; 143. (rus.).

23. Zaitsev O.N., Stepanтова N.A., Tsiplina A., Emirova E., Kunskey M. Heat exchange in gas flows of heat exchange water heaters at solid fuel operation. *Construction and Industrial Safety*. 2017; 7(59):135-140. EDN ZWBTFM. (rus.).

24. Barysheva O.B., Khabibullin Iu.Kh., Khasanova G.R. The efficiency of application the developed solid fuel boilers of long burning. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2016; 1(35):123-127. EDN VUSKIH. (rus.).

25. Andreyev S.A., Zaginailov V.I., Vorobiev V.A. Electrotechnological method of controlling burning in pyrolysis boilers. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"*. 2019; 2(90):53-58. EDN ZDPQXJ. (rus.).

26. Mayalvina E.G. *Building heat loss*. Moscow, AVOK-Press, 2007; 141. (rus.).

27. Shvedov G.V., Sipacheva O.V., Savchenko O.V. *Electricity losses during its transmission through electrical networks: calculation, analysis, regulation and reduction*. Moscow, Publishing House "MEI", 2013; 424. EDN SUOPLV. (rus.).

28. Gafurov A.M., Osipov B.M., Gatin R.Z., Gafurov N.M. Possible ways of decrease in emissions of carbon dioxide gas. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2017; 19(9-10):21-31. EDN YPSXTE. (rus.).

29. Butcher T.A., Trojanowski R. Effect of Thermal Storage on the Emissions and Efficiency Performance of a Wood-Pellet-Fired Residential Boiler. *ACS Omega*. 2020; 5(44):28517-28528. DOI: 10.1021/acsomega.0c03080. EDN VGSEHQ.

Received December 2, 2025.

Adopted in revised form on February 5, 2026.

Approved for publication on February 5, 2026.

BIONOTES: **Alexey L. Toropov** — Candidate of Technical Sciences, General Director — Chief Designer; **Engineering Center "April"**; 13 Schelkovskoe shosse, Moscow, 105122, Russian Federation; ID RSCI: 1030472, Scopus: 58406665800, ORCID: 0000-0002-7457-6948; Toropov@aprilgroup.ru.

Межотраслевая оценка Волжско-Камского каскада
гидроузлов на действующих и проектных отметках

Никита Николаевич Чернобровкин, Дмитрий Вячеславович Козлов
Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование направлено на оценку эффективности доведения Волжско-Камского каскада до проектных уровней. Актуальность обусловлена необходимостью обоснования для принятия управленческих решений, нацеленных на отраслевые эффекты. Научная новизна заключается в применении комплексного сравнения между различными отраслями проекта. Цель исследования — определение целесообразности доведения уровней воды в Чебоксарском и Нижнекамском водохранилищах до проектных отметок. Рассмотрена эффективность проекта в ержек с их количественной оценкой по сценариям.

Материалы и методы. В качестве исходных материалов использованы данные технико-экономической оценки завершения строительства Чебоксарской ГЭС, официальные сведения о функционировании Волжско-Камского каскада, а также нормативно-правовые и стратегические документы. Применены методы экономической оценки инвестиционных проектов, сценарного анализа и дисконтирования.

Результаты. Показано, что доведение уровней воды до проектных отметок приводит к увеличению выработки и располагаемой мощности гидроэлектростанций, устранению ограничений судоходства на Единой глубоководной системе, снижению эксплуатационных затрат на дноуглубительные работы и улучшению гидрологического и экологического состояния водохранилищ. Для всех рассмотренных сценариев получен положительный интегральный межотраслевой эффект, существенно превышающий показатели при сохранении непроектных уровней.

Выводы. Результаты исследования свидетельствуют о положительных межотраслевых эффектах доведения водохранилищ до проектных отметок. Проект целесообразен и подлежит практической реализации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: эффективность, эффект, инвестиционный проект, сценарий, гидроузел, водохранилище, каскад, уровень воды, проектная и непроектная отметки, отрасль, выгоды, издержки

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чернобровкин Н.Н., Козлов Д.В. Межотраслевая оценка Волжско-Камского каскада гидроузлов на действующих и проектных отметках // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 4. С. 628–640. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.628-640

Автор, ответственный за переписку: Никита Николаевич Чернобровкин, kitchrkit@gmail.com.

Intersectoral assessment of the Volga-Kama cascade of
hydropower plants operating at existing and design water levels

Nikita N. Chernobrovkin, Dmitry V. Kozlov
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The study aims to assess the effectiveness of raising the Volga-Kama cascade to its design levels. The relevance stems from the need to provide a basis for management decisions aimed at achieving sector-wide effects. The scientific novelty of this research lies in a comprehensive comparative analysis of various aspects of the project. The aim of the study is to determine the feasibility of raising water levels in the Cheboksary and Nizhnekamsk reservoirs to their design levels. The study examines the project's effectiveness in terms of key benefits and costs, with a quantitative assessment of these across different scenarios.

Materials and methods. The source materials used include data from the technical and economic assessment of the completion of the Cheboksary Hydroelectric Power Station, official information on the operation of the Volga-Kama cascade, as well as regulatory, legal and strategic documents. Methods of economic evaluation of investment projects, scenario analysis and discounting were applied.

Results. The results demonstrate that restoring design water levels leads to a significant increase in hydropower generation and available installed capacity, removal of navigation depth constraints on the Unified Deep-Water System, reduction of recurrent dredging expenditures, and improvement of hydrological and ecological conditions in the reservoirs. For all considered scenarios, the aggregated intersectoral effect remains positive and substantially exceeds the outcomes associated with continued operation at non-design water levels.

Conclusions. The findings of the study indicate that raising the reservoirs to their design levels will have positive cross-sectoral effects. The project is feasible and should be implemented.

KEYWORDS: the efficiency, impact, investment project, scenario, hydropower plant, reservoir, cascade, water level, design and non-design water level, industry, advantages, and costs

FOR CITATION: Chernobrovkin N.N., Kozlov D.V. Intersectoral assessment of the Volga-Kama cascade of hydropower plants operating at existing and design water levels. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(4):628-640. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.628-640 (rus.).

Corresponding author: Nikita N. Chernobrovkin, kitchrkit@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация Чебоксарского и Нижнекамского водохранилищ в составе Волжско-Камского каскада гидроузлов на непроектных отметках привела к ряду межотраслевых проблем — недополучается возобновляемая электроэнергия, снижается эффективность использования вложенных инвестиций в гидроэлектростанции, не реализована проектная глубина судового хода на международном транспортном коридоре «Север – Юг», неполное заполнение водохранилищ нарушает экологические и гидрологические режимы водных объектов, не завершено строительство сооружений инженерной защиты прибрежных территорий. Значительные средства, вложенные в гидроузлы и рассчитанные на работу при отметке уровня воды в водохранилищах 68 м, фактически «заморожены» и приводят к разрушению сооружений без отдачи¹.

Вопросы в сфере управления режимами эксплуатации водохранилищ становятся все более актуальными. В первую очередь это связывается с ростом конкуренции между отраслями за водные ресурсы, изменениями климатических условий и необходимостью обеспечения устойчивого функционирования водохозяйственных систем.

В зарубежных исследованиях многоцелевому управлению водохранилищами в условиях неопределенности уделяется большое внимание [1–4]. Разрабатываются методы оптимального регулирования режимов, которые дают возможность сбалансировать выработку электроэнергии, защиту от наводнений, судоходство, экологические требования и др. [2, 3, 5, 6]. Повышение устойчивости правил эксплуатации водохранилищ к климатической и гидрологической изменчивости — еще один ключевой фокус исследований [1, 7, 8]. Учет сезонных лимитов уровня воды в правилах регулирования может существенно влиять на частоту наводнений ниже по течению [3]. Также анализируются исторические данные, позволяющие выявить фактические закономерности для управления водохранилищами [9].

В отечественной литературе проблемы функционирования Волжско-Камского каскада гидроузлов

рассматриваются с различных сторон. Отмечаются изменения гидрологического режима и системные последствия многолетнего регулирования стока. В частности, снижение половодья из-за зарегулирования негативно сказывается на естественных условиях нереста ценных видов рыб в низовьях Волги [10]. Ряд работ посвящен биологическим индикаторам состояния водохранилищ Волги — изучению видового разнообразия и динамики зоопланктона [11, 12]. Для отдельных водохранилищ, эксплуатируемых не на проектом уровне, выявлены специфические неблагоприятные эффекты (описаны гидрологические и экологические проблемы Чебоксарского водохранилища [13]) и оценены возможные экологические последствия изменения уровня режима [14]. Экологические и водохозяйственные проблемы Волжского бассейна остаются в центре внимания специалистов [15, 16].

Вопросы водопользования и управления режимами Волжско-Камского каскада освещаются во многих отечественных трудах прикладного характера. Анализируется современный режим работы водохранилищ и его влияние на условия водного транспорта [17–19]. Установлено, что недостаточная глубина судового хода на отдельных участках Волги, вызванная ненаполненностью водохранилищ, ограничивает судоходство; обсуждаются различные варианты решения этой проблемы [19]. В контексте глобального изменения климата изучаются межгодовые тенденции водности Волги [20, 21] и предлагаются адаптационные меры [22]. Кроме того, проводится оценка эффективности различных сценариев эксплуатации каскада по отношению к изменчивости гидрологического режима, включая расчеты отдачи при альтернативных вариантах функционирования [23]. Также рассматриваются вопросы обеспечения безопасной эксплуатации гидроузлов и предотвращения чрезвычайных ситуаций², а проблема нехватки воды в низовьях Волги обуславливает необходимость совершенствования режимов и реализации компенсирующих мероприятий [16].

Однако большинство упомянутых исследований носит отраслевой характер и не обеспечивает комплексного учета межотраслевых эффектов. На-

¹ Выполнение технико-экономической оценки варианта завершения строительства Чебоксарской ГЭС на отметку НПУ 63,0 метра : отчет о НИР // ПАО «РусГидро». М. : ПАО «РусГидро», 2017. Т. 1–12. 2000 с.

² Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ (с измен. и доп.). URL: <https://www.meteorf.gov.ru/documents/6/30/full/>

стоящая работа призвана восполнить этот пробел. В сложившихся условиях для определения целесообразности доведения уровней воды в указанных водохранилищах до проектных отметок следует выполнить оценку эффективности такого инвестиционного проекта (далее — проект) с учетом межотраслевых выгод и издержек³.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалами инициативных исследований стали официальные сведения о функционировании Волжско-Камского каскада гидроузлов, результаты технико-экономической оценки варианта завершения строительства Чебоксарской ГЭС на отметку НПУ 63,0 м 2017 г.⁴, нормативно-правовые документы в области национальной экономики и водных отношений^{3, 4, 5}, данные о тарифах на электрическую энергию в РФ на 2025 г.⁶ и стратегические документы развития внутреннего водного транспорта страны до 2030 г.⁷ Оценка эффективности инвестиционного проекта выполнена в соответствии с методическими рекомендациями 1999 г.³ В расчетах учитывались коммерческая, бюджетная, а также общественная эффективность. В соответствии с принятой методологией³, бюджетный эффект рассчитывался как превышение дополнительных доходов бюджета над расходами, обусловленными реализацией проекта. Общественная эффективность, или народнохозяйственный эффект, учитывает все выгоды и издержки инвестиционного проекта, включая внешние эффекты, вне зависимости от перераспределения средств между участниками. Для комплексной оценки рассмотрен прирост выгод и затрат при переходе от базового сценария (НПУ = 63 м без дополнительных мероприятий) к альтернативным сценариям завершения проекта.

Сценарии, принятые в расчетной оценке (рис. 1):

- пессимистичный (ПВ): консервативные предположения (высокие нормы дисконтирования, низ-

кие прогнозные цены/урожаи, увеличение издержек);

- базовый (БВ): умеренные, наиболее вероятные оценки параметров;
- оптимистичный (ОВ): благоприятные допущения (низкий дисконт, рост цен, эффективность реализации мер).

Методика расчета по каждому направлению включает поэтапное определение:

- прироста/снижения физических показателей (энергетика, судоходство, экология и др.) при переходе от 63 к 68 м;
- перевод изменений в денежные величины посредством рыночных цен или нормативов;
- дисконтирование потоков доходов и затрат для расчета интегральных эффектов.

Расчетный горизонт проекта принят в 25 лет. Для соизмерения единовременных инвестиций и ежегодных выгод используется аннуитетный метод. Капитальные затраты K переводятся в эквивалентные ежегодные платежи A по формуле аннуитета. Формула аннуитетного платежа имеет вид:

$$A = K \cdot \frac{r(1+r)^N}{(1+r)^N - 1},$$

где A — эквивалентная ежегодная сумма затрат; K — капитальные затраты, руб.; r — годовая ставка дисконтирования; N — период службы/кредита, лет.

Расчеты проводятся с соблюдением действующих национальных нормативно-методических документов по оценке инвестиционных проектов³, цены приведены на 2025 г., что позволяет корректно учитывать эффекты для всех участников.

Для выявления полной картины реализации инвестиционного проекта при разных сценариях развития применялись экспертные оценки. Выбор сценарного подхода обусловлен высокой неопределенностью ключевых параметров проекта, что соответствует практике анализа крупных гидротехнических инвестиционных решений³ [1, 7].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрены результаты сценарных расчетов.

Энергетика. Одним из главных эффектов поднятия уровня воды в водохранилище до проектного является рост выработки электроэнергии и использование полной установленной мощности ГЭС. Чебоксарская ГЭС при НПУ 68 м сможет работать на полном проектном напоре, достигая мощности 1404 МВт и среднегодовой выработки ~3,3 млрд кВт·ч/год. В текущем режиме станция ограничена показателями: ~820 МВт и ~2,2 млрд кВт·ч/год, т.е. недопроизводит порядка 1,1–1,3 млрд кВт·ч электроэнергии ежегодно¹. Нижнекамская ГЭС вместо фактических ~1,63 млрд кВт·ч/год при мощности ~566 МВт приблизится к проектным показателям ~2,67 млрд кВт·ч и 1248 МВт при доведении уровня до 68 м. Сум-

³ Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция) : утв. Минэкономики РФ, Минфином РФ, Госстроем РФ от 21.06.1999 № ВК 477.

⁴ О безопасности гидротехнических сооружений : Федеральный закон от 21.07.1997 № 117-ФЗ (посл. ред.).

⁵ О предельных минимальных и максимальных уровнях тарифов на электрическую энергию (мощность), поставляемую населению и приравненным к нему категориям потребителей, по субъектам Российской Федерации на 2025 год : приказ ФАС России от 11.10.2024 № 718/24 (ред. от 18.06.2025).

⁶ Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года : утв. распоряжением Правительства РФ от 29.02.2016 № 327-р.

⁷ Беднарчук С.Е. Регулирование речного стока каскадами водохранилищ : учебное пособие. М. : ИВП РАН, 2020. 151 с.

марный прирост генерации по двум гидростанциям каскада оценивается 2,0–2,4 млрд кВт·ч в год, а прирост располагаемой мощности — около 900 МВт¹.

Это приводит к значительному коммерческому эффекту. Предполагая минимальный тариф ~1,2 руб/кВт·ч, прирост в 2,2 млрд кВт·ч генерирует ~2,6 млрд руб/год выручки. Дополнительные мегаватты генерирующей мощности выйдут на рынок мощности (КОМ) и принесут дополнительную выручку: при условной цене ~150 тыс. руб/МВт·мес это около 1,2–1,3 млрд руб/год (для прироста 700–800 МВт) [3]. Суммарно прямой доход энергетического сектора приближается к ~4 млрд руб. ежегодно. Эти доходы частично перенаправятся в бюджеты (НДС, налог на прибыль и т.д.) через выплату дивидендов генерирующими компаниями, формируя положительный эффект в виде роста поступлений в бюджеты. Увеличение производства дешевой гидроэнергии может вытеснить более дорогую генерацию на тепловых электростанциях, что снизит издержки потребителей и улучшит экологическую обстановку за счет сокращения сжигания топлива.

Экономический эффект проекта остается положительным даже при консервативных допущениях, так как ГЭС является одним из самых дешевых источников электроэнергии, и ее продукция найдет сбыт на объединенном рынке. Существенным также будет неявный эффект продления срока службы гидроэнергетического оборудования — при нормализации режимов работы ГЭС гидротурбины реже выходят из строя, что снижает будущие капиталовложения^{1,3}.

Расчет суммарного эффекта включает приведенную стоимость дополнительной выработки и аннуитетный доход от прироста мощности. Эти выгоды по нормативной методике приносят основную долю итоговых положительных эффектов. Повышается энергобезопасность региона, создается резерв ма-

невренной мощности, генерируются дополнительная прибыль и налоговые поступления, улучшается использование возобновляемого потенциала рек Волги и Камы^{1,3}. Полученные оценки согласуются с выводами зарубежных исследований о высокой чувствительности эффективности гидроэнергетических объектов к режимам эксплуатации водохранилищ [1, 4, 5], а также с результатами отечественных работ по Волжско-Камскому каскаду [23]. На рис. 1 приведено сравнение сценариев при различных уровнях НПУ.

Судоходство и транспортный эффект. Следующим ключевым аргументом в пользу доведения Чебоксарского гидроузла до отметки 68 м служит решение многолетней проблемы недостаточной глубины на Единой глубоководной системе (ЕГС) европейской части РФ на Волжском участке от Нижегородского (Городецкого) гидроузла до Нижнего Новгорода. При нынешнем НПУ = 63 м гарантированная глубина 4,0 м там не обеспечивается, фактически ~3,5–3,8 м достигаются лишь при высоких расходах через Нижегородскую (Горьковскую) ГЭС⁷. Это создает узкое место на важнейшем водно-транспортном пути. Грузовые суда вынуждены недогружать около 20 % своей грузоподъемности на данном отрезке реки, чтобы уменьшить осадку; особо крупнотоннажные суда зачастую не могут пройти мелководье с полной загрузкой — им приходится перегружать часть груза на мелкоосидящие баржи, проходить участок и затем вновь догружаться, что неэффективно. Пропускная способность судоходных шлюзов теряется, образуются очереди до двух недель на шлюзование у Городца. Пассажирские круизные суда также страдают — их пропускают ограниченно, лишь несколько часов в сутки в период специальных повышенных сбросов воды, что срывает их расписания. В итоге водный транспорт утратил конкурентные позиции: если в 1950 г. внутренний водный транспорт обеспечивал ~8,8 %

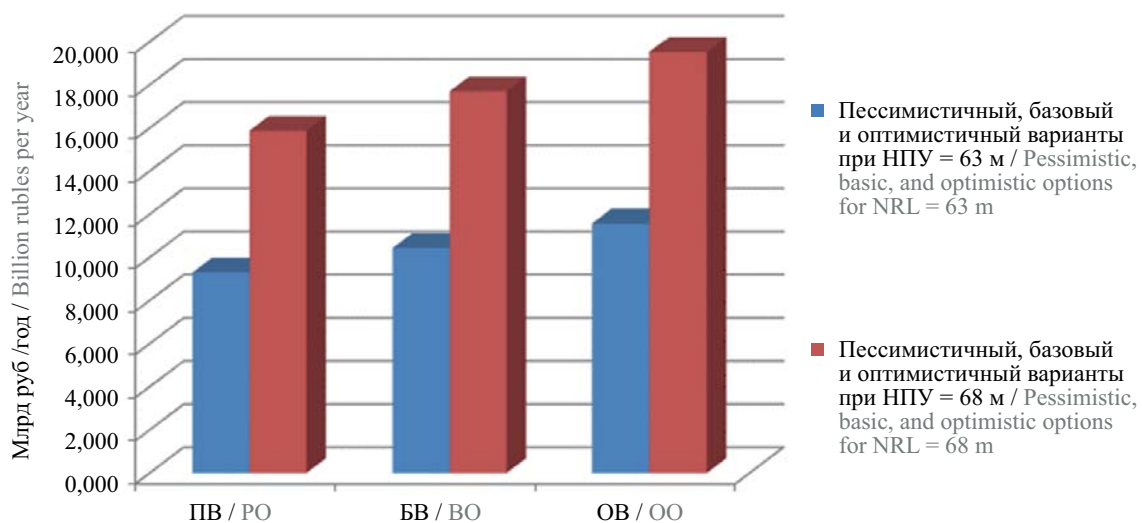


Рис. 1. Сценарные расчеты упущенной выгоды энергетики, млрд руб/год

Fig. 1. Scenario calculations of lost energy profits, billion rubles/year

грузооборота по стране, то к 2005 г. — лишь ~2,1 %. Хотя на это повлияли и другие факторы, глубинное ограничение на Волге — один из ключевых факторов падения речных перевозок⁷.

Поднятие уровня воды до отметки 68 м решает проблему глубин на этом участке принципиально¹. Нормальный подпор Чебоксарской ГЭС доводит верхний бьеф у Городца до расчетной отметки, ликвидируя мелководный порог. Гарантированные 4,0 м глубины станут поддерживаться постоянно в навигационный период без необходимости высоких сбросов. Это позволит судам повысить загрузку на 20–25 %. Время прохождения участка сократится с двух суток до нормального транзита в пределах нескольких часов. Очереди на шлюзах существенно уменьшатся. Экономический эффект для судоходства проявится в снижении расходов на транспортировку тонны груза, следовательно, расход топлива и расходы экипажа на тонно-километр уменьшатся. Исчезнет и потребность в перегрузочных операциях и содержании дополнительного флота меньшей осадки — сегодня это прямые убытки судоходных компаний и грузоотправителей. Устранение узкого места может вернуть часть грузопотоков на реку, разгрузив железные дороги и автотранспорт¹.

Растущие перевозки означают рост выручки речных перевозчиков и дополнительные налоговые поступления — коммерческий и бюджетный эффект.

В анализе, кроме того, выгоды судоходства частично учитываются через избегаемые альтернативные затраты. Если без поднятия уровня для обеспечения требуемых глубин (а в проектных материалах вариант с Нижегородским низконапорным гидроузлом (ННГУ) при 63 м присутствует) необходимо было строить ННГУ, то стоимость этого строительства (~45 млрд руб. согласно технико-экономическому обоснованию (ТЭО))¹ можно расценивать как альтернативную цену решения навигационной проблемы. При реализации варианта с поднятием уровня эти затраты не требуются, что составляет огромную экономию инвестиций. Фактически, экономия составляет ~45 млрд руб. капитальных вло-

жений (или ориентировочно ~3–4 млрд руб. в год в аннуитете) и является косвенной выгодой варианта с НПУ = 68 м.

Сценарные показатели упущенной выгоды в судоходстве представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Для социума проект дает крупный положительный транспортный эффект. Улучшение условий судоходства на Волжско-Камском водном пути оживит внутренний водный транспорт, повысит конкурентоспособность международного транспортного коридора «Север – Юг», снизит нагрузку на другие виды транспорта. Кроме прямой экономии издержек перевозчиков, это принесет эффект для экономики припортовых регионов и всей логистической системы¹. Аналогичные выводы о критичности глубин на участке Городец – Нижний Новгород для функционирования ЕГС получены в работах [18, 19], что подтверждает корректность принятых допущений.

Дноуглубительные работы. При текущей пониженной отметке уровня воды в Чебоксарском водохранилище поддержание судоходных глубин требует значительного постоянного дноуглубления русел Волги и Оки. Ежегодно проводятся эксплуатационные работы по углублению фарватера, удалению наносов и прорезке мелеющих участков. По данным ТЭО, ориентировочный объем таких ежегодных работ на верхнем участке составляет 0,4 млн м³ грунта по Волге и до 0,4 млн м³ по устью Оки. Только на участке от Нижнего Новгорода до Чебоксарского гидроузла ежегодно извлекаются сотни тысяч кубометров грунта для поддержания навигационной обстановки. Помимо этого, также требуются периодические капитальные дноуглубления в проблемных местах для подходов каналов и портов (Борский речной узел, Нижний Новгород), необходима была выемка свыше 1,3 млн м³ грунта одновременно для приведения глубин к стандарту на отметке 63 м¹.

В стоимостном выражении расходы на дноуглубление весьма ощутимы. Если принять минимальную стоимость подъема грунта и отвала ~500 руб/м³, то ежегодные суммарные по Волге и Оке 0,8 млн м³ обходятся примерно в 400 млн руб. эксплуатационных затрат в год. Эти расходы несет в основном

Табл. 1. Сценарные показатели упущенной выгоды в судоходстве, млрд руб/год

Table 1. Scenario indicators of lost profits in shipping, billion rubles/year

Эффект (показатель)/сценарий Effect (indicator)/scenario	ПВ PO	БВ BO	ОВ OO
Недогруз судов / Underloaded ships	2,025	3,960	5,700
Уменьшение рейсов / Reduction of sea voyages	0,593	1,015	1,421
Отмена лихтеровки / Cancellation of lightening	0,160	0,264	0,360
Простои / Downtime	1,080	1,440	1,620
Итого, млрд руб/год Total, billion rubles/year	3,858	6,679	9,101
Чистая стоимость за 25 лет, млрд руб. Net worth over 25 years, billion rubles	44,956	71,301	89,396

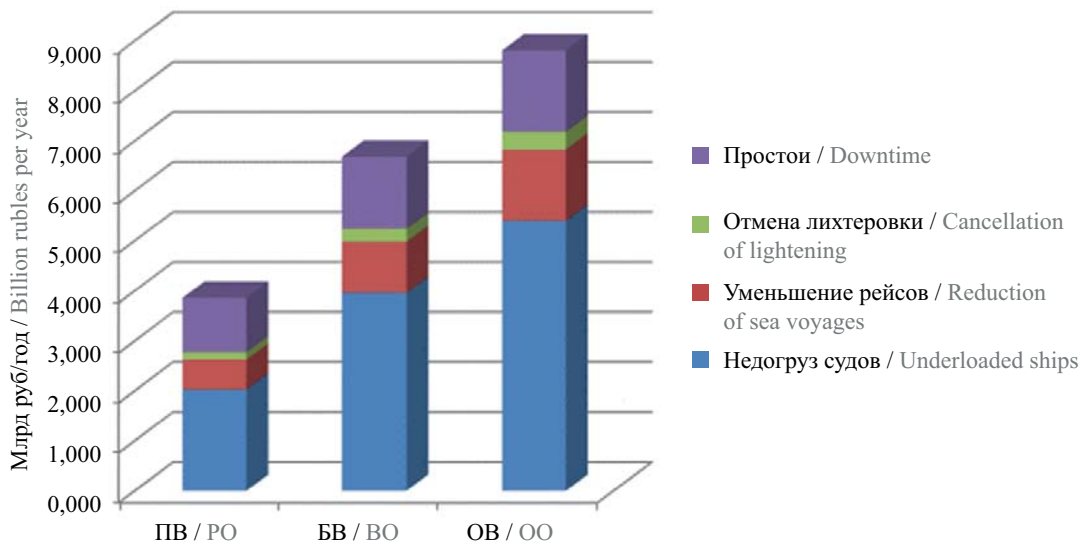


Рис. 2. Сценарное сравнение упущенной выгоды в судоходстве, млрд руб/год
Fig. 2. Scenario comparison of lost profits in shipping, billion rubles/year

федеральный бюджет через Росморречфлот, либо они компенсируются из региональных средств⁷. При поднятии уровня воды до 68 м необходимость в таких работах резко сократится. Глубина будет обеспечена естественно, и заилиение фарватера не потребует постоянного выборочного углубления кроме обычного поддержания навигационной обстановки. Практически можно ожидать сокращения эксплуатационного дноуглубления в несколько раз¹.
Экономический эффект от сокращения дноуглубления учитывается как снижение эксплуата-

ционных издержек. Для бюджета это прямая выгода — освобождение средств. Ресурсы могут быть перенаправлены на другие нужды отрасли или не выделяться, улучшая бюджетный баланс. Общественный эффект также положителен — дноуглубительные работы часто связаны с негативными экологическими воздействиями, их сокращение снизит антропогенную нагрузку.
Сценарные показатели ежегодных затрат на дноуглубление при отметке НПУ = 63 м представлены на рис. 3. Стоит отметить, что при любом сценарии

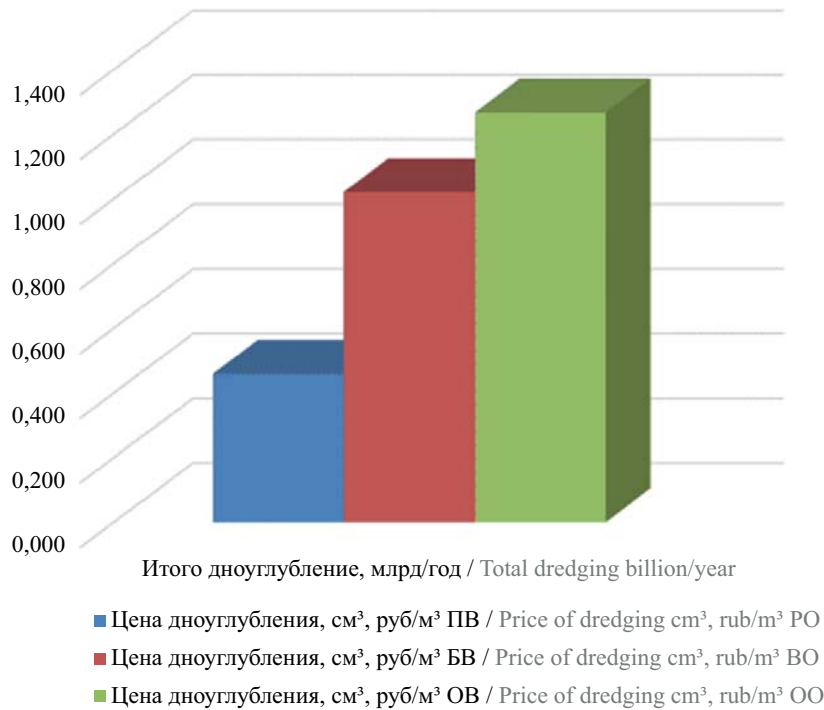


Рис. 3. Сценарные показатели ежегодных затрат на дноуглубление при текущей отметке НПУ = 63 м, млрд руб/год
Fig. 3. Scenario indicators of annual dredging costs at the current NRL level of 63 m, billion rubles/year

часть дноуглубления останется необходимой — в устьевых участках притоков или для обустройства новых причалов. Но различие между сценарием при отметке НПУ 63 и 68 м — кардинальное.

Подъем уровня позволит существенно снизить затраты на дноуглубление, высвобождая до нескольких сотен миллионов рублей ежегодно. В интегральном эффекте проекта это учитывается как положительный поток (экономия средств) на протяжении всего периода эксплуатации гидроузла. Помимо финансовой экономии, углубление фарватера естественным способом предпочтительнее с экологической точки зрения и обеспечивает более стабильные навигационные условия без постоянного вмешательства¹.

Берегоукрепление и инженерная защита берегов. Затраты на берегоукрепление и инженерную защиту прибрежных территорий — один из крупных компонентов издержек доведения водохранилища до проектного уровня. При повышении уровня воды до 68 м произойдет подтопление и частичное затопление дополнительных прибрежных земель, что потребует защиты населенных пунктов, инфраструктуры и сельхозугодий¹. В проекте изначально предусматривался комплекс соответствующих мер: строительство защитных дамб и насыпей вокруг ряда населенных пунктов, укрепление откосов, обустройство дренажных систем для снижения уровня грунтовых вод на прилегающих территориях и прочее. Значительная часть этих работ была начата еще в 1980-х гг., но не доведена до конца из-за остановки проекта строительства Чебоксарского гидроузла. В результате к настоящему времени инженерная защита выполнена частично — некоторые возведенные сооружения, рассчитанные на отметку 68 м, сейчас недогружены и частично разрушаются, а непригодные берега испытывают повышенную эрозию на текущей отметке 63 м. Без завершения системы дренажа осталась нерешенной проблема подтопления низменных

территорий (заречная часть г. Нижнего Новгорода испытывает подтопление грунтовыми водами до ~33 % площади)^{1, 5}.

При сравнении сценариев нужно учитывать, что значительные финансовые расходы на берегоукрепление необходимы и в случае сохранения НПУ = 63 м. Даже без поднятия уровня требуется достроить сооружения инженерной защиты для решения существующих проблем подтопления и обеспечения безопасности при редких высоких паводках. Реализация мер инженерной защиты целесообразна независимо от выбора отметки, поскольку это приведет к нормализации водного режима на подтопленных территориях и защитит от 1%-ных паводков на реке [24]. То есть часть затрат на берегоукрепление неизбежна в любом сценарном варианте¹.

Однако при варианте НПУ = 68 м объем защитных мероприятий чуть выше, придется поднять существующие дамбы до более высокой отметки, возможно построить новые участки защитных сооружений, переместить инженерные коммуникации. Также увеличится масштаб переселения населения из зон затопления: по оценкам, при подъеме уровня будут затронуты десятки населенных пунктов (упоминается 59 деревень в Нижегородской области и ~10 в Марий Эл и Чувашии, которые попадут в зону затопления). Людей необходимо отселить и компенсировать потерю имущества, что входит в смету проекта¹. С другой стороны, некоторые из этих территорий изначально планировались под затопление еще при строительстве, фактически люди там проживали с пониманием ситуации.

Дополнительные приведенные ежегодные затраты на берегоукрепление для НПУ = 68 м при различных рассмотренных сценариях представлены на рис. 4.

В денежном выражении в расчетах учитываются инвестиционные затраты на инженерную защиту и переселение (с дальнейшим превращением

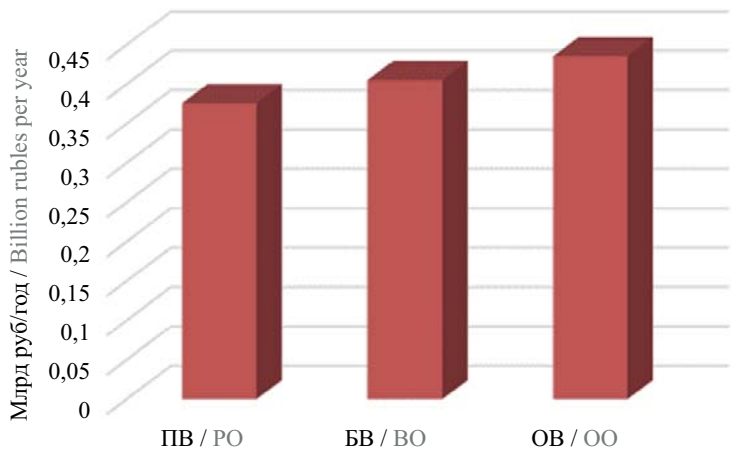


Рис. 4. Дополнительные приведенные ежегодные затраты на берегоукрепление для НПУ = 68 м при сценариях ПВ/БВ/ОВ

Fig. 4. Additional reduced annual costs for bank protection for NRL = 68 m under scenarios PO/BO/OO

их в ежегодные эквиваленты через аннуитет), а также разница в эксплуатационных затратах на содержание защитных сооружений. Также учитывается бюджетный аспект, где значительная часть затрат на берегоукрепление финансируется государством, но при варианте НПУ = 68 м часть расходов может взять на себя ПАО «РусГидро» как инвестор, либо федеральный центр — это влияет на распределение бюджетного эффекта¹. Однако с точки зрения общественной эффективности источники финансирования не важны, важен общий объем ресурсов. Он, как показано, минимален при выборе варианта с поднятием уровня.

Издержки на берегоукрепление велики, но необходимы в любом случае, и вариант доведения до проектного уровня не является самым дорогим. При правильном планировании мер инженерной защиты удастся надежно оградить населенные территории от подтопления (в том числе уже страдающие при 63 м) и минимизировать ущерб от более высокого уровня. Эти мероприятия улучшат ситуацию с оползнями и эрозией берегов, что сегодня причиняет ущерб при недозаполненном водой водохранилище. В общеэкономическом балансе затраты на берегоукрепление рассматриваются как необходимая инвестиция для раскрытия выгод по другим направлениям, и они полностью заложены в расчет интегрального эффекта¹.

Экологические аспекты. Экологические последствия поднятия уровня неоднозначны, включают как негативные, так и позитивные эффекты. Повышение отметки НПУ до проектного значения приведет к затоплению дополнительных земель — лесов, лугов, сельхозугодий, возможно, части охраняемых природных территорий. По доступным оценкам, при подъеме Чебоксарского водохранилища до 68 м в зоне затопления и подтопления окажется около 127 тыс. га — эти цифры приводятся в экологических экспертизах проекта¹. Также необходимо перенести объекты культурного наследия, кладбища, линии коммуникаций. Все это обычно оценивается в рамках оценки воздействия на окружающую среду и требует компенсационных мероприятий. В денежном выражении экологический ущерб может быть частично учтен как потеря природных ресурсов. Такие оценки приведены в ТЭО, хотя зачастую они носят условный характер¹.

С другой стороны, существующее непроектное состояние водохранилища порождает экологические проблемы, которые будут во многом решены при достижении проектных параметров. При НПУ 63 м образовались чрезмерные мелководья — около 33 % площади, тогда как по санитарным нормам допустимо не более 20 %¹. Мелководные заливы, заболоченные пространства приводят к застою воды, образованию больших масс разлагающейся растительности, что ухудшает качество водных ресурсов. При подъеме уровня глубины увеличатся, мелко-

водья сократятся до норматива или ниже, что приведет к улучшению состояния водной среды. Уменьшение площади мелководий снизит и затраты на очистку воды для хозяйственно-питьевых нужд, т.е. население и предприятия Водоканала получают выгоду (более чистая вода, меньше реагентов для водоподготовки)¹.

Также появление проектной полезной емкости водохранилища позволит осуществлять изначально проектом регулирование стока. В период половодья часть воды можно будет аккумулировать, смягчая пики паводков. А в межень, наоборот, можно осуществлять попуски воды для поддержания уровней в низовьях. Станет возможным обеспечивать необходимый объем воды для обводнения Волго-Ахтубинской поймы — уникальной экосистемы в дельте Волги, страдающей от маловодья. Это улучшит условия нереста ценных пород рыб, поддержит водно-болотные угодья, сельское хозяйство Нижней Волги. Сейчас при отсутствии полезного объема Чебоксарское водохранилище не выполняет никакой регулирующей роли и не может помочь низовьям реки, а при проектом наполнении каскад ГЭС вновь станет полноценной регулирующей системой¹.

Важный социально-экологический момент — снижение риска катастрофических паводков. При эксплуатации на отметке 63 м водохранилище менее защищено от экстремальных паводков, у него нет резервного свободного объема для приема паводковых вод. Это чревато тем, что при сверхпроектном паводке возможны неконтролируемый перелив через плотину гидроузла и ГЭС или необходимость сбрасывать весь приток, затопляя нижний бьеф. На проектом уровне обычно предусматриваются резервный объем в водохранилище и аварийные водосбросы, позволяющие безопасно пропустить даже 1%-ный паводок. Доведение до отметки НПУ = 68 м плюс строительство необходимых водосбросов снизит вероятность наводнений ниже по Волге, что благоприятно отразится и на экологии, и на защите населения¹.

Стоит добавить, что ранее в расчетах ТЭО коммерческая эффективность рыбного хозяйства не оценивалась, но такая мера обеспечивает коммерческую продукцию, что может дать положительный эффект.

Вариант с поднятием уровня имеет сбалансированное влияние на окружающую среду. Негативные воздействия в значительной мере могут быть компенсированы инженерными мероприятиями. Позитивные эффекты длительны и устойчивы — улучшение качества воды, нормализация гидрологического режима, снижение техногенной нагрузки, восстановление рыбных запасов. В денежном выражении экологические плюсы тяжело оценить точно, но качественно можно утверждать, что экологическая ситуация в регионе в долгосрочной перспективе выиграет от реализации проектного уровня при условии строгого выполнения всех природоохранных меро-

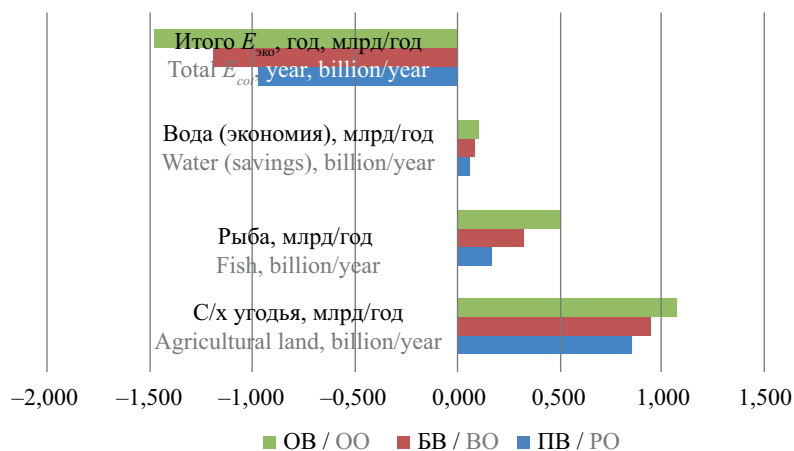


Рис. 5. Сценарные экологические показатели при отметке НПУ = 68 м, млрд руб/год

Fig. 5. Scenario environmental indicators at the NRL level of 68 m, billion rubles/year

приятный. По крайней мере, доведение до НПУ = 68 м решает те экологические проблемы, которые уже много лет остро стоят из-за недозаполненного водой водохранилища. В общественной эффективности эти факторы учтены через условные экономические оценки (стоимость улучшения воды, предотвращенный ущерб от наводнений и т.д.), а также как качественное обоснование необходимости проекта. Сценарные экологические показатели при отметке НПУ = 68 м приведены на рис. 5. Полученные качественные выводы согласуются с результатами исследований экологического состояния водохранилищ Волги, указывающих на негативную роль избыточных мелководий при пониженных уровнях [11–14].

Прочие эффекты и соображения. К категории «прочие» относятся эффекты, не вошедшие напрямую в рассмотренные выше отраслевые разделы, но влияющие на итоговую оценку. Среди них:

1. Социально-экономическое развитие регионов. Повышение надежности энергоснабжения и улучшение логистической инфраструктуры создают предпосылки для промышленного и аграрного развития Поволжья. В перспективе это может привлечь новые инвестиции, создать рабочие места — эффекты, выходящие за рамки прямых расчетов, но важные в стратегическом плане.

2. Использование вложенных инвестиций прошлого. Как отмечалось, в советский период были затрачены значительные средства на объекты, рассчитанные на уровень воды 68 м. Отказ от поднятия уровня означает, что эти объекты либо останутся навсегда замороженными и бесполезными, либо потребуют демонтажа. Их ценность будет потеряна. Завершение строительства позволит ввести в действие те мощности и инфраструктуру, которые уже частично созданы, тем самым повысив отдачу от ранее инвестированных государственных средств. В сущности, это тоже экономический эффект — предотвра-

щение потери капитала (инвестиций). Он учитывается как снижение условного ущерба.

3. Правовые и имиджевые аспекты. Проект НПУ = 68 м проходит через процедуры государственной экспертизы и общественных слушаний. В 2014 г. проект повышения уровня получил положительное заключение государственной экологической экспертизы, т.е. признан приемлемым при выполнении сформулированных условий. Реализация проекта будет свидетельствовать о способности государства довести до конца ранее намеченные планы, что укрепляет доверие к власти в регионах. Эти имиджевые факторы, хотя и не поддаются прямому денежному выражению, имеют значение для социального эффекта. Соблюдение прав жителей затопляемых территорий (справедливая компенсация, переселение в улучшенные условия) — важный социальный результат.

4. Альтернативные издержки. Если проект не реализовывать, то придется мириться с продолжающимися потерями — энергокомпании недополучают выручку (и компенсируют ее повышением тарифов для остальных), судоходная отрасль деградирует, ежегодно тратятся средства на решение постоянных проблем (дноуглубление, аварийные берегоукрепления). Есть риск техногенной аварии — разрушение недостроенных плотин при неблагоприятных условиях, что может повлечь чрезвычайные расходы. Упущенные выгоды от нереализации проекта фактически равны рассмотренным выше прямым выгодам от его реализации.

Все прочие эффекты, как правило, входят в общественную эффективность.

Коммерческие выгоды и издержки и бюджетные последствия в рассмотренных выше разделах уже в основном охватывают измеримые части. В «прочих» остается главным образом то, что сложно точно посчитать, но что влияет на общественное благосостояние. Улучшение качества воды можно отчасти выразить экономией на здравоохранении (меньше болезней

Табл. 2. Сценарные сводные показатели при отметке НПУ = 68 м, млрд руб/год

Table 2. Scenario summary indicators at the NRL level of 68 m, billion rubles/year

Сценарий Scenario	Энергетика Energy sector	Судоходство Shipping	Дноуглубление Dredging	Берегозащита Coast protection	Экология Ecology	Итого Total
ПВ / PO	6,580	3,858	0,234	0,376	–0,975	10,072
БВ / BO	7,264	6,679	1,020	0,405	–1,188	14,181
ОВ / OO	7,948	8,801	1,267	0,435	–1,480	16,971

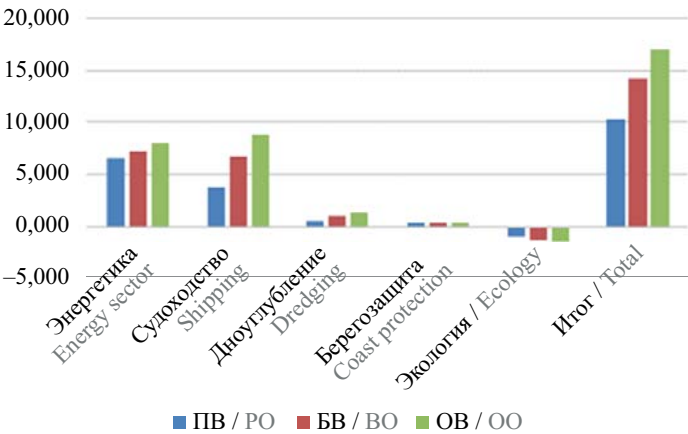


Рис. 6. Итоговые сценарные показатели, млрд руб/год

Fig. 6. Final scenario indicators, billion rubles/year

от некачественной воды), сохранение экосистем — затратами на их возможное восстановление и т.д.

Проверено несколько сценариев — пессимистический, базовый, оптимистический — с различными допущениями по ценам, объему грузопотока и т.п. Сценарные сводные (итоговые) показатели при отметке НПУ = 68 м представлены в табл. 2 и на рис. 6. Во всех сценариях вариант с доведением Чебоксарского водохранилища до отметки 68 м показывает положительный интегральный эффект, тогда как варианты с сохранением отметки 63 м либо малоэффективны, либо прямо убыточны для государства и общества. Результат говорит о высокой значимости ключевых выгод и относительном влиянии вариантов параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты однозначно свидетельствуют о положительном межотраслевом эффекте доведения

каскада Волжско-Камских водохранилищ до проектных уровней. Завершение строительства Чебоксарской и Нижнекамской ГЭС на проектных отметках позволит получить абсолютный выигрыш в энергетике и транспорте, решить застарелые экологические проблемы, повысить безопасность и эффективность работы водохранилищ. По всем рассмотренным критериям (коммерческому, бюджетному, общественному) вариант НПУ = 68 м превосходит все указанные альтернативы. Ранее сделанные выводы о неэффективности проекта объясняются неполным учетом эффектов и занижением затрат альтернатив. С научно-экономических позиций проект целесообразен и подлежит практической реализации. Управленческое решение о старте проекта будет обоснованным шагом, открывающим новые возможности для социально-экономического развития Приволжского федерального округа, Поволжья в целом и рационального использования ресурсов р. Волги.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Upadhyay D., Bhatia U. Designing Resilient Multipurpose Reservoir Operation Policies in Presence of Internal Climate Variability // Water Resources Research. 2025. Vol. 61. Issue 7. DOI: 10.1029/2024WR038160. EDN YQYISQ.

2. Ni X., Dong Z., Jiang Y., Xie W., Yao H., Chen M. A subjective-objective integrated multi-

objective decision-making method for reservoir operation featuring trade-offs among non-inferior solutions themselves // Journal of Hydrology. 2022. Vol. 613. P. 128430. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128430. EDN XFYEEA.

3. Jiang M., Qiao C., Lu F., Zhu K., Zhu C. The impact of reservoirs with seasonal flood limit water level on

the frequency of downstream floods // *Journal of Hydrology*. 2024. Vol. 644. P. 132009. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132009. EDN PRNSQU.

4. Fang G., Zhang C., Wu Z., Tan Q., Gu G., Yan M. Research on Multiobjective Optimal Scheduling of Reservoir Based on Ecological Flow-Process Level // *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2023. Vol. 149. Issue 11. DOI: 10.1061/jwrmd5.wreng-6075. EDN OMZEMJ.

5. Song Y. Hydrodynamic impacts on algal blooms in reservoirs and bloom mitigation using reservoir operation strategies: a review // *Journal of Hydrology*. 2023. Vol. 620. P. 129375. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129375. EDN GENMDZ.

6. Ma X., Liao S., Liu B., Zhao H., Cheng C., Su H. Multi-objective solution and decision-making framework for coordinating the short-term hydropeaking–navigation–production conflict of cascade hydropower reservoirs // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 422. P. 138602. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138602. EDN HQXYBF.

7. Larabi S., Schnorbus M.A., Zwieters F. Diagnosing the ability of reservoir operations to meet hydropower production and fisheries needs under climate change in a western cordillera drainage basin // *Climatic Change*. 2023. Vol. 176. Issue 12. P. 161. DOI: 10.1007/s10584-023-03632-y. EDN MDWBIF.

8. Sunil A., Singh R., Molakala M. Adaptive (re) operations facilitate environmental flow maintenance downstream of multi-purpose reservoirs // *Journal of Hydrology*. 2024. Vol. 644. P. 132123. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132123. EDN ONULBH.

9. Li D., Chen Ya., Lyu L., Cai X. Uncovering Historical Reservoir Operation Rules and Patterns: Insights From 452 Large Reservoirs in the Contiguous United States // *Water Resources Research*. 2024. Vol. 60. Issue 8. DOI: 10.1029/2023wr036686. EDN XIWVUG.

10. Zhezmer V., Dudakov N. Influence of the Volga-Kama cascade of reservoirs on the hydrological regime during the flood and the quality of the spawning cycle of fish in the Lower Volga // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 454. P. 02007. DOI: 10.1051/e3sconf/202345402007. EDN LCRQFK.

11. Gavrilko D., Zhikharev V., Zolotareva T., Kudrin I., Yakimov B., Erlashova A. Biodiversity of zooplankton (Rotifera, Cladocera and Copepoda) in the tributaries of Cheboksary Reservoir (Middle Volga, Russia) // *Biodiversity Data Journal*. 2024. Vol. 12. DOI: 10.3897/bdj.12.e116330. EDN DIOEMR.

12. Lazareva V.I., Zhdanova S.M., Sabitova R.Z., Sokolova E.A. Zooplankton of Volga River reservoirs: structure, abundance and dynamics // *Inland Water Biology*. 2024. Vol. 17. Issue 1. Pp. 148–161. DOI: 10.1134/S1995082924010103. EDN PWRCJF.

13. Ильина А.А., Никонорова И.В., Ильин В.Н., Никитина Е.А. Гидрологические и экологические проблемы Чебоксарского и Куйбышевского водо-

хранилищ Чебоксарского участка Чувашской Республики // *Успехи современного естествознания*. 2023. № 6. С. 34–39. DOI: 10.17513/use.38050. EDN JFIWHY.

14. Шашуловская Е.А., Мосияш С.А. Межгодовые изменения содержания органического вещества и биогенных элементов в водохранилищах Нижней Волги: влияние климатической трансформации // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2024. № 3. С. 83–100. DOI: 10.35567/19994508-2024-3-83-100. EDN DTUNCX.

15. Сазонов А.А., Лисина А.А., Ерина О.Н., Фролова Н.Л., Ломаков О.И., Платонов М.М. Синхронные исследования качества воды реки Волги // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2024. № 5. С. 97–114. DOI: 10.35567/19994508-2024-5-98-114. EDN TJNWSV.

16. Болгов М.В., Беляев А.И. Водные проблемы Нижней Волги: основные факторы и компенсирующие мероприятия // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2023. Т. 87. № 6. С. 862–874. DOI: 10.31857/S2587556623060031. EDN EZEJWU.

17. Поддубный С.А., Законнова А.В., Цветков А.И., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. Современный гидрологический режим Волжских водохранилищ // *Водные ресурсы*. 2023. Т. 50. № 3. С. 249–262. DOI: 10.31857/S0321059623030100. EDN DCFTDU.

18. Георгиевский М.В., Горошкова Н.И., Еремеева А.О., Гладков Г.Л., Стриженко А.В., Семенова Д.А. Оценка вероятности возникновения опасных для судоходства гидрологических явлений на нижней Волге и Дону // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2023. № 6. С. 44–56. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_4. EDN WHLOJO.

19. Родионов А.А., Румянцев В.А., Фёдоров М.П., Зиновьев А.Т., Кривошей В.А., Медведева О.Е. и др. Варианты решения проблем судоходства на лимитированном участке реки Волги от Городецкого гидроузла до Нижнего Новгорода, в том числе с учетом оценки влияния на санитарно-эпидемиологическую и экологическую ситуацию в регионе // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15. № 4. С. 109–131. DOI: 10.59887/fpg/abfh-m2n7-9mn6. EDN LPDZD.

20. Селезнев В.А. Межгодовые изменения водности реки Волги в условиях глобальных климатических изменений // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2024. № 6. С. 7–21. DOI: 10.35567/19994508-2024-6-7-21. EDN ZXEOHA.

21. Калугин А.С. Сток рек европейской части России при глобальном потеплении на 1,5 и 2 градуса // *Водные ресурсы*. 2023. Т. 50. № 4. С. 451–464. DOI: 10.31857/s0321059623040120. EDN QJXLZE.

22. Селезнева А.В., Селезнев В.А. Повышение уровня воды Куйбышевского водохранилища в усло-

виях климатических изменений // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 4. С. 25–43. DOI: 10.35567/1999-4508-2025-4-25-43. EDN EXMLTZ.

23. Беднарук С.Е., Чуканов В.В., Мاستрюкова А.В., Чернобровкин Н.Н. Разработка математической модели Волго-Ахтубинской поймы и дельты р. Волги как инструмента совершенствования режимов работы Нижневолжских водохранилищ // Россий-

ский журнал прикладной экологии. 2025. № 2 (42). С. 51–58. DOI: 10.24852/2411-7374.2025.2.51.58. EDN EVUFJA.

24. Гордиенко А.Н., Рожко О.И., Петрученко А.И. Организация предотвращения чрезвычайных ситуаций на примере работы гидроузлов Волжско-Камского каскада // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 6. № 2. С. 157–168. DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.157. EDN QIFEJV.

Поступила в редакцию 19 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 4 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 4 февраля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Никита Николаевич Чернобровкин** — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; kitchrkit@gmail.com;

Дмитрий Вячеславович Козлов — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; kozlovdv@mgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Upadhyay D., Bhatia U. Designing Resilient Multi-purpose Reservoir Operation Policies in Presence of Internal Climate Variability. *Water Resources Research*. 2025; 61(7). DOI: 10.1029/2024WR038160. EDN YQYISQ.

2. Ni X., Dong Z., Jiang Y., Xie W., Yao H., Chen M. A subjective-objective integrated multi-objective decision-making method for reservoir operation featuring trade-offs among non-inferior solutions themselves. *Journal of Hydrology*. 2022; 613:128430. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128430. EDN XFYEAA.

3. Jiang M., Qiao C., Lu F., Zhu K., Zhu C. The impact of reservoirs with seasonal flood limit water level on the frequency of downstream floods. *Journal of Hydrology*. 2024; 644:132009. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132009. EDN PRNSQU.

4. Fang G., Zhang C., Wu Z., Tan Q., Gu G., Yan M. Research on Multiobjective Optimal Scheduling of Reservoir Based on Ecological Flow-Process Level. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2023; 149(11). DOI: 10.1061/jwrmd5.wreng-6075. EDN OMZEMJ.

5. Song Y. Hydrodynamic impacts on algal blooms in reservoirs and bloom mitigation using reservoir operation strategies : a review. *Journal of Hydrology*. 2023; 620:129375. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129375. EDN GENMDZ.

6. Ma X., Liao S., Liu B., Zhao H., Cheng C., Su H. Multi-objective solution and decision-making framework for coordinating the short-term hydropowering–navigation–production conflict of cascade hydropow-

er reservoirs. *Journal of Cleaner Production*. 2023; 422:138602. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138602. EDN HQXYBF.

7. Larabi S., Schnorbus M.A., Zwiers F. Diagnosing the ability of reservoir operations to meet hydropower production and fisheries needs under climate change in a western cordillera drainage basin. *Climatic Change*. 2023; 176(12):161. DOI: 10.1007/s10584-023-03632-y. EDN MDWBIF.

8. Sunil A., Singh R., Molakala M. Adaptive (re) operations facilitate environmental flow maintenance downstream of multi-purpose reservoirs. *Journal of Hydrology*. 2024; 644:132123. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132123. EDN ONULBH.

9. Li D., Chen Ya., Lyu L., Cai X. Uncovering Historical Reservoir Operation Rules and Patterns: Insights From 452 Large Reservoirs in the Contiguous United States. *Water Resources Research*. 2024; 60(8). DOI: 10.1029/2023wr036686. EDN XIWVUG.

10. Zhezmer V., Dudakov N. Influence of the Volga-Kama cascade of reservoirs on the hydrological regime during the flood and the quality of the spawning cycle of fish in the Lower Volga. *E3S Web of Conferences*. 2023; 454:02007. DOI: 10.1051/e3sconf/202345402007. EDN LCRQFK.

11. Gavrilko D., Zhikharev V., Zolotareva T., Kudrin I., Yakimov B., Erlashova A. Biodiversity of zooplankton (Rotifera, Cladocera and Copepoda) in the tributaries of Cheboksary Reservoir (Middle Volga, Russia). *Biodiversity Data Journal*. 2024; 12. DOI: 10.3897/bdj.12.e116330. EDN DIOEMR.

12. Lazareva V.I., Zhdanova S.M., Sabitova R.Z., Sokolova E.A. Zooplankton of Volga River reservoirs: structure, abundance and dynamics. *Inland Water Biology*. 2024; 17(1):148-161. DOI: 10.1134/S1995082924010103. EDN PWRCJF.

13. Ilina A.A., Nikonorova I.V., Ilin V.N., Nikitina E.A. Hydrological and ecological problems of Cheboksary and Kuibyshev reservoirs of Cheboksary section of the Chuvash republic. *Advances in Current Natural Sciences*. 2023; 6:34-39. DOI: 10.17513/use.38050. EDN JFIWHY. (rus.).

14. Shashulovskaya E.A., Mosiyash S.A. Interannual changes in the content of organic matter and biogenic elements in reservoirs of the lower Volga: the influence of climatic transformation. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024; 3:83-100. DOI: 10.35567/19994508-2024-3-83-100. EDN DTUNCX. (rus.).

15. Sazonov A.A., Lisina A.A., Erina O.N., Frolova N.L., Lomakov O.I., Platonov M.M. Synchronous studies of the Volga river water quality. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024; 5:97-114. DOI: 10.35567/19994508-2024-5-98-114. EDN TJNWSV. (rus.).

16. Bolgov M.V., Belyaev A.I. Water problems of the Lower Volga: main factors and compensating measures. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*. 2023; 87(6):862-874. DOI: 10.31857/S2587556623060031. EDN EZEJWU.

17. Poddubnyi S.A., Zakonnova A.V., Tsvetkov A.I., Trofinmenko L.T., Shvets' N.V. Current hydrological regime of the Volga reservoirs. *Water Resources*. 2023; 50(3):249-262. DOI: 10.31857/S0321059623030100. EDN DCFTDU. (rus.).

18. Georgievsky M.V., Goroshkova N.I., Eremina A.O., Gladkov G.L., Strizhenok A.V., Semenova D.A. Assessment of dangerous hydrological events probability for navigation on the lower Volga and don based on water levels and ice phenomena data. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*.

2023; 6:44-56. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_4. EDN WHLOJO. (rus.).

19. Rodionov A.A., Rumyantsev V.A., Fyodorov M.P., Zinoviev A.T., Krivoshei V.A., Medvedeva O.Ye. et al. Solution options for problems of navigation on a limited section of the Volga river from Gorodetsky hydroelectric complex to Nizhny Novgorod, including taking into account the assessment of the impact on the sanitary-epidemiological and environmental situation in the region. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022; 15(4):109-131. DOI: 10.59887/fpg/abfh-m2n7-9mn6. EDN LPSDZD. (rus.).

20. Seleznev V.A. Inter/annual changes in the Volga river water content under global climate change. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024; 6:7-21. DOI: 10.35567/19994508-2024-6-7-21. EDN ZXEOHA. (rus.).

21. Kalugin A.S. River runoff of the European part of Russia under global warming of 1.5 and 2 degrees. *Water Resources*. 2023; 50(4):451-464. DOI: 10.31857/s0321059623040120. EDN QJXLZE. (rus.).

22. Selezneva A.V., Seleznev V.A. The Kuibyshev Reservoir water level increasing in the context of the climate change. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025; 4:25-43. DOI: 10.35567/1999-4508-2025-4-25-43. EDN EXMLTZ. (rus.).

23. Bednaruk S.E., Chukanov V.V., Mastryukova A.V., Chernobrovkin N.N. Development of the Volga-Akhtuba floodplain and the Volga river delta mathematical model as a tool for improving of the lower Volga reservoirs management. *Russian Journal of Applied Ecology*. 2025; 2(42):51-58. DOI: 10.24852/2411-7374.2025.2.51.58. EDN EVUFJA. (rus.).

24. Gordienko A.N., Rozhko O.I., Petruchenko A.I. Organization of emergency forecasting during the flood period on the example of a pass through the waterworks of the Volga-Kama cascade. *Hydrosphere. Hazard Processes and Phenomena*. 2025; 6(2):157-168. DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.157. EDN QIFEJV. (rus.).

Received December 19, 2025.

Adopted in revised form on February 4, 2026.

Approved for publication on February 4, 2026.

BIONOTES: **Nikita N. Chernobrovkin** — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; kitchrkit@gmail.com;

Dmitry V. Kozlov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; kozlovdv@mgsu.ru.

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

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 005.7

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.641-651

Методический подход к оценке готовности строительной организации к трансформации корпоративной культуры

Александр Романович Супрун, Наталья Николаевна Таскаева

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Несмотря на достигнутые успехи в производственной деятельности строительных организаций дальнейшее ускорение их развития связано с трансформацией корпоративной культуры с учетом современных возможностей цифровизации, обеспечением технологического суверенитета, формированием конкурентных преимуществ. Это определяет актуальность решения задачи выбора направления совершенствования корпоративной культуры, адаптированной к требованиям рассматриваемого периода времени, на основе разработки методического подхода к управлению трансформацией корпоративной культуры с учетом факторов внешней и внутренней среды и разработки системы количественных показателей для оценки готовности строительных организаций к трансформации корпоративной культуры.

Материалы и методы. Решение поставленной задачи осуществлялось на основе применения таких методов исследования, как анкетирование и интегративный системный подход, сочетающий количественные и качественные методы анализа данных. Анализ открытых информационных источников и сбор информации через структурированное анкетирование персонала с использованием специально разработанного опросника позволили систематизировать практический опыт взаимодействия в коллективе строительных организаций в зависимости от специфики производственной деятельности.

Результаты. Определены проблемные области в современном состоянии корпоративной культуры строительных организаций. Это позволило наметить направление трансформации корпоративной культуры с учетом стратегических целей развития строительных организаций и предложить методические решения по ее реализации. На основе интегративного системного подхода, сочетающего количественные и качественные методы анализа данных, решена задача по формированию системы количественных показателей для оценки готовности строительных организаций к трансформации корпоративной культуры.

Выводы. Реализация выбранного направления трансформации корпоративной культуры строительных организаций с учетом факторов внешней и внутренней среды дает возможность обеспечить достижение стратегических целей строительных организаций, а предложенная система показателей оценки их готовности к трансформации корпоративной культуры обеспечит объективную оценку состояния корпоративной культуры, что позволит принимать обоснованные управленческие решения с пониманием масштаба и последовательности мероприятий по ее трансформации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: корпоративная культура, строительные организации, факторы внешней и внутренней среды, методический подход к управлению трансформацией корпоративной культуры, система количественных показателей, оценка готовности строительных организаций к трансформации корпоративной культуры

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Супрун А.Р., Таскаева Н.Н. Методический подход к оценке готовности строительной организации к трансформации корпоративной культуры // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 4. С. 641–651. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.641-651

Автор, ответственный за переписку: Александр Романович Супрун, aleksandr.suprun28@mail.ru.

Methodical approach to assessing the readiness of a construction organization to transform corporate culture

Alexander R. Suprun, Natalia N. Taskaeva

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

ABSTRACT

Introduction. Despite the successes achieved in the production activities of construction organizations, the further acceleration of their development is associated with the transformation of corporate culture, considering modern digitalization op-

portunities, ensuring technological sovereignty, and the formation of competitive advantages. This determines the urgency of solving the problem of choosing a direction for improving the corporate culture, adapted to the requirements of the period under review, based on the development of a methodological approach to managing the transformation of the corporate culture, taking into account the factors of the external and internal environment, and the development of a system of quantitative indicators to assess the readiness of construction organizations to transform the corporate culture.

Materials and methods. The solution of this task was carried out based on the use of such research methods as questioning and an integrative systematic approach that combines quantitative and qualitative methods of data analysis. Analysis of open information sources and data collection through structured questioning of personnel using a specially developed questionnaire made it possible to systematize the practical experience of interaction in the team of construction organizations depending on the specifics of production activities.

Results. As a result of the study, problem areas in the current state of the corporate culture of construction organizations were identified. This allowed us to outline the direction of the transformation of corporate culture, considering the strategic goals of the development of construction organizations and propose methodological solutions for its implementation. Based on an integrative system approach, combining quantitative and qualitative methods of data analysis, the task of forming a system of quantitative indicators to assess the readiness of construction organizations to transform corporate culture was solved.

Conclusions. The implementation of the chosen direction of transformation of the corporate culture of construction organizations, taking into account the factors of the external and internal environment, will ensure the achievement of the strategic goals of construction organizations, and the proposed system of indicators for assessing the readiness of construction organizations to transform the corporate culture will provide an objective assessment of the state of the corporate culture, which will make it possible to take reasonable managerial measures with an understanding of the scale and sequence of measures for its transformation.

KEYWORDS: corporate culture, construction organizations, factors of the external and internal environment, a methodological approach to managing the transformation of corporate culture, a system of quantitative indicators, an assessment of the readiness of construction organizations to transform corporate culture

FOR CITATION: Suprun A.R., Taskaeva N.N. Methodical approach to assessing the readiness of a construction organization to transform corporate culture. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(4):641-651. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.641-651 (rus.).

Corresponding author: Alexander R. Suprun, aleksandr.suprun28@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях динамичного развития экономики и постоянно усиливающейся глобализации бизнес-процессов строительная отрасль сталкивается с комплексом многоуровневых вызовов, требующих кардинальных изменений в подходах к управлению организациями и стратегическому планированию их развития. Важная роль в этом процессе принадлежит корпоративной культуре. Корпоративная культура обеспечивает укрепление взаимосвязи всех членов строительного процесса, закрепление строительных кадров при направленной вовлеченности их в достижение поставленных целей, повышение управляемости и скорости выполнения производственных задач на основе доверия и внутренней мотивации. В строительных организациях корпоративная культура позволяет компенсировать жесткость и неповоротливость системы управления, достигать стратегических целей организации на базе ценностных отношений, строить устойчивую репутацию через развитие человеческого капитала. Вместе с тем корпоративная культура в большинстве российских строительных организаций находится на низком уровне развития, что не соответствует современным требованиям и задачам, тормозит адаптацию к новым условиям. В силу этого необходима целенаправленная трансформация действующей корпоративной культуры. Однако трансформация культуры — это сложный процесс, успех которого напрямую зависит от точной диагностики исходного состояния организации. Без предварительной оценки готовности к изменениям даже правильно вы-

бранные управленческие решения могут не достичь цели, встретив скрытое сопротивление или столкнувшись с неучтенными барьерами. Таким образом, начальным и критически важным этапом преобразований должна стать объективная оценка готовности строительной организации к трансформации ее корпоративной культуры.

Активная цифровизация производственных процессов, автоматизация строительных технологий, повышение требований к качеству и безопасности строительства со стороны государственных органов и потребителей, а также острая необходимость интеграции в глобальные цепочки создания стоимости актуализируют вопросы трансформации корпоративной культуры как ключевого элемента организационного развития и конкурентного преимущества. Особую значимость данная проблематика приобретает в контексте специфических особенностей строительной деятельности: ориентация на реализацию проектов с временными коллективами; многонациональность трудовых коллективов и связанные с этим межкультурные коммуникационные барьеры; повышенные риски травматизма и профессиональных заболеваний, требующие формирования особой культуры безопасности труда [1]. Эти отраслевые особенности, в том числе вопросы формирования культуры у будущих специалистов [2], обуславливают целесообразность разработки специализированного методического подхода к оценке готовности, который учитывал бы указанную специфику.

Анализ современных российских исследований в рассматриваемой области демонстрирует неоднозначность и многовариантность подходов к понима-

нию роли корпоративной культуры в строительных организациях, что отражает сложность и многогранность этого феномена. Отечественные ученые справедливо отмечают, что низкий уровень развития корпоративной культуры в организациях является критическим фактором, препятствующим эффективному управлению человеческими ресурсами, в том числе в строительных организациях [3], отрицательно влияющим на общую производительность труда [4]. Они особо подчеркивают, что в основе результативной корпоративной культуры лежит система взаимосвязанных принципов: стратегическая ориентация на результат и ценность для клиента; взаимодействие и лидерство; непрерывное обучение и развитие; адаптивность и инновационность; этичность, порядочность, инклюзивность [1]. Практический опыт ведущих российских строительных компаний убедительно подтверждает высокую эффективность целенаправленных инвестиций в развитие персонала и корпоративной культуры как источника долгосрочной конкурентоспособности и устойчивого развития [5]. В то же время существующие исследования главным образом концентрируются на описании успешных итогов или общих принципах, оставляя без внимания вопрос диагностики исходной готовности компании к движению в сторону этих целей [2].

Зарубежные научные работы предлагают более системный и стратегически ориентированный взгляд на проблематику корпоративной культуры в строительстве, рассматривая ее как интегральный элемент организационной эффективности, оказывающий прямое влияние на отношение и производительность сотрудников [6]. Международные исследования убедительно подтверждают недостаточность формального следования правилам и процедурам без глубокого понимания культурных аспектов и психологических особенностей трудовых коллективов [7, 8]. Зарубежные ученые рассматривают корпоративную культуру как стратегический ресурс организации, способный выполнять функции эффективного инструмента для привлечения талантов и механизма управления персоналом для удержания ключевых сотрудников [9, 10]. Особое внимание в международной литературе уделяется уникальной способности развитой корпоративной культуры существенно снижать потребность в формальном контроле за счет интернализации организационных ценностей сотрудниками [11]. Однако, невзирая на развитый концептуальный аппарат, вопрос о конкретных методиках оценки готовности организации, особенно в условиях строительной отрасли, также остается недостаточно раскрытым.

Несмотря на растущий академический и практический интерес к проблематике корпоративной культуры в различных отраслях экономики, исследования выявляют ряд существенных нерешенных научных и практических задач, требующих дальнейшего изучения. Как российские, так и зарубежные

авторы констатируют, что теоретические основы корпоративной культуры находятся в стадии активного развития и концептуального переосмысления, а имеющиеся теоретические концепции нередко не соответствуют практическим реалиям функционирования организаций в условиях турбулентной внешней среды [12]. Критическим пробелом в современной науке является отсутствие комплексных методологических подходов не только к управлению трансформацией как таковой, но, что особенно важно, — к предварительной диагностике готовности к этой трансформации. Отсутствие таких подходов, в том числе базовых основ для разработки культуры применительно к строительным предприятиям [13], не позволяет организациям оценить риски и разработать адресную программу изменений, учитывающую стартовые условия [14, 15].

Научная проблема, рассмотренная в статье, заключается в фундаментальном противоречии между широким признанием стратегической важности корпоративной культуры и необходимостью ее трансформации, с одной стороны, и недостаточной разработанностью научно обоснованных методических инструментов для оценки готовности строительной организации к таким преобразованиям — с другой. Существующие в научной литературе исследования носят преимущественно фрагментарный характер и анализируют отдельные аспекты проблемы в изоляции, не предлагая целостного системного подхода к оценке готовности, интегрирующего стратегические, организационные и человеческие факторы с учетом отраслевой специфики строительства.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью решения выявленной научной проблемы в контексте современных вызовов. Пандемия COVID-19 наглядно продемонстрировала критическую важность адаптивности и подготовленности корпоративной культуры для обеспечения организационной устойчивости [15, 16], а интенсивные процессы цифровой трансформации требуют кардинального пересмотра традиционных подходов [17]. При этом объективная сложность и длительность процессов трансформации, связанные с необходимостью изменения укоренившихся поведенческих паттернов [18–21], делают предварительную диагностику готовности не просто полезным, а обязательным условием успеха, минимизирующим риски и ресурсные потери.

Решение выявленной проблемы связано с разработкой методического подхода к оценке готовности строительной организации к трансформации корпоративной культуры. Для реализации этой цели должны быть проанализированы факторы и условия, определяющие готовность строительной организации к трансформации корпоративной культуры, определены ключевые компоненты, критерии и система индикаторов для оценки каждого компонента готовности, разработана система показа-

телей и практический инструментарий проведения комплексной оценки, которые позволят до начала масштабных преобразований получить объективную картину готовности, выявить «узкие места», оценить риски и разработать обоснованный план трансформации корпоративной культуры, тем самым существенно повысить вероятность успешной реализации изменений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выбор темы исследования обусловлен совокупностью взаимосвязанных факторов, определяющих его теоретическую и практическую актуальность. Во-первых, строительная отрасль характеризуется уникальными организационными особенностями, которые предъявляют специфические требования к корпоративной культуре: высокий уровень профессиональных рисков, проектно-ориентированная деятельность с временными трудовыми коллективами, многоуровневая система субподрядных отношений и жесткие регуляторные требования в области безопасности труда и качества. Эти особенности формируют особый контекст, в котором процессы трансформации культуры протекают с характерными барьерами и драйверами. Во-вторых, систематический анализ научной литературы выявил существенный пробел в области инструментальных методов диагностики и оценки, в частности, недостаточную разработанность количественных и интегративных методик, позволяющих измерить готовность организации к изменениям. Имеющиеся исследования часто базируются на качественных подходах, что ограничивает возможности сравнительного анализа и разработки точных управленческих решений. В-третьих, интенсивные процессы цифровизации и технологической модернизации в строительстве формируют новые вызовы для традиционной корпоративной культуры, требуя разработки адаптивных, измеримых и практико-ориентированных подходов к управлению организационными изменениями.

Теоретико-методологический анализ осуществлялся посредством систематического библиографического поиска в научных базах данных (Web of Science, Scopus, РИНЦ, eLIBRARY), контент-анализа и сравнительного анализа ключевых публикаций за период 2019–2025 гг., а также критического анализа существующих концепций корпоративной культуры, управления изменениями и отраслевого менеджмента [22, 23]. Данный этап позволил сформировать концептуальную основу исследования.

Методологическую основу исследования составляет интегративный системный подход, объединяющий принципы теории корпоративной культуры (Э. Шейн, К. Камерон, Р. Куинн) [24, 25], теории управления организационными изменениями (К. Левин, Дж. Коттер) [26, 27] и отраслевого менеджмента в строительстве. Такой подход обес-

печивает комплексное рассмотрение готовности к трансформации как многоаспектного феномена, охватывающего стратегические, структурные, процессные и человеческие факторы. Исследование реализовано с применением комплекса взаимодополняющих количественных и качественных методов сбора, обработки и интерпретации данных.

Эмпирическое исследование было структурировано в четыре последовательных этапа, обеспечивающих логическую целостность работы:

1. Теоретико-методологический анализ: систематизация факторов трансформации, определение ключевых компонентов готовности и разработка концептуальной модели оценки.

2. Разработка методического инструментария: создание системы показателей, проектирование измерительных инструментов (опросник), проведение экспертной валидации и пилотного тестирования для проверки надежности и валидности.

3. Эмпирическое исследование (сбор первичных сведений): организация и проведение масштабного анкетирования в строительной организации для сбора эмпирических данных.

4. Анализ и интерпретация результатов: статистическая обработка собранной информации, верификация показателей, анализ результатов и формулирование выводов и практических рекомендаций.

Основным методом сбора первичных данных выступило структурированное анкетирование сотрудников строительной организации с использованием специально разработанного опросника. Опросник включает 45 вопросов, систематизированных по пяти ключевым блокам-компонентам готовности к трансформации:

Блок 1. Лидерство и готовность руководства к изменениям (9 вопросов).

Блок 2. Качество внутрикорпоративных коммуникаций (8 вопросов).

Блок 3. Ресурсное обеспечение изменений (7 вопросов).

Блок 4. Инновационная восприимчивость персонала (10 вопросов).

Блок 5. Уровень потенциального сопротивления персонала изменениям (11 вопросов).

Для измерения установок и восприятия респондентов применялась 10-балльная шкала Лайкерта от 1 («категорически не согласен») до 10 («полностью согласен»), что обеспечивает необходимую детализацию и чувствительность измерений. В качестве объекта эмпирического исследования выбрана строительная организация ООО «Максима» (г. Мытищи), специализирующаяся на коммерческом строительстве. Выбор обусловлен типичностью компании для сектора среднего бизнеса в строительстве, наличием проектной структуры и актуальностью для ее руководства задач организационного развития в условиях цифровой трансформации отрасли.

На основе теоретического анализа и с учетом специфики строительных организаций была разработана система из пяти взаимосвязанных показателей (по одной для каждого блока опросника), построенных на принципах поэтапности оценки, комплексности анализа, учета отраслевой специфики и практической применимости результатов. Показатели обеспечивают количественное выражение уровня готовности по каждому компоненту и позволяют рассчитать интегральный индекс готовности строительной организации к трансформации корпоративной культуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках исследования разработан комплексный методический подход к оценке готовности строительной организации к трансформации корпоративной культуры. Подход реализован в виде системы из пяти взаимосвязанных показателей, позволяющих проводить поэтапную диагностику, мониторинг и оценку устойчивости изменений. Показатели построены на принципах комплексности, учета отраслевой специфики строительства и практической применимости. Ключевые показатели и их назначение систематизированы в табл. 1.

Система ключевых показателей

Индекс готовности к трансформации (ИГТ)

Данный интегральный показатель является отправной точкой оценки. Он рассчитывается на ос-

нове пяти взвешенных компонентов, выявленных как наиболее значимые для строительной отрасли:

$$\begin{aligned} \text{ИГТ} = & 0,3 \cdot \text{Л} + 0,25 \cdot \text{К} + 0,2 \cdot \text{Р} + \\ & + 0,15 \cdot \text{И} + 0,1 \cdot (10 - \text{С}), \end{aligned}$$

(1)

где Л (лидерство): готовность руководства к изменениям (оценка 0–10); К (коммуникация): открытость и эффективность внутренних коммуникаций (0–10); Р (ресурсы): доступность финансовых, временных и человеческих ресурсов для изменений (0–10); И (инновации): общая восприимчивость персонала к новым технологиям и методам работы (0–10); С (сопротивление): уровень сопротивления персонала изменениям (0–10; в формуле инвертируется).

Обоснование весовых коэффициентов, приведенное в табл. 2, основано на специфике строительной отрасли, где централизованное лидерство и координация между специальностями являются критическими факторами успеха.

Интерпретация ИГТ:

- 8–10 баллов: организация готова к радикальной трансформации;
- 6–7,9 баллов: готовность к постепенным, эволюционным изменениям;
- 4–5,9 баллов: необходима масштабная подготовительная работа;
- <4 баллов: высокий риск неудачи; трансформация не рекомендуется без изменения исходных условий.

Табл. 1. Система показателей для управления трансформацией корпоративной культуры

Table 1. A system of indicators for managing corporate culture transformation

Наименование показателя Naming of the indicator	Назначение и этап применения Purpose and stage of application	Период времени использования Time period of use
Индекс готовности к трансформации (ИГТ) The Index of readiness for Transformation (IRT)	Диагностика исходной готовности организации к изменениям на этапах предварительной оценки и планирования Diagnostics of the initial readiness of the organization for changes at the stages of preliminary assessment and planning	Перед началом изменений и каждые 6 месяцев Before the start of the changes and every 6 months
Коэффициент культуры безопасности труда (ККБТ) Occupational Safety Culture Coefficient (OSCC)	Мониторинг критического для строительства аспекта — культуры безопасности труда в ходе реализации изменений Monitoring of the safety culture, which is critical for construction, during the implementation of changes	Ежемесячный мониторинг Monthly monitoring
Индекс командной эффективности (ИКЭ) The Index of Team Effectiveness (ITE)	Оценка качества взаимодействия в проектных командах в процессе трансформации Assessment of the quality of interaction in project teams during the transformation process	Ежеквартальная оценка Quarterly assessment
Скорость адаптации культуры (САК) The rate of cultural adaptation (RCA)	Оценка динамики внедрения новых практик в период активной фазы изменений Assessment of the dynamics of the introduction of new practices during the active phase of changes	Ежемесячно в период активных изменений Monthly during the period of active changes
Индекс устойчивости культурных изменений (ИУКИ) Cultural Change Sustainability Index (CCSI)	Контроль долгосрочной эффективности и укорененности произведенных изменений Monitoring the long-term effectiveness and rootedness of the changes made	Каждые 6 месяцев на этапе закрепления Every 6 months during the consolidation phase

Табл. 2. Обоснование весовых коэффициентов для расчета ИГТ

Table 2. Justification of weighting factors for calculating the IRT

Компонент Component	Вес, % Weight, %	Обоснование Justification
Лидерство Leadership	30	Критическая роль руководства в инициировании и поддержке изменений в централизованных структурах строительных компаний The critical role of management in initiating and supporting changes in the centralized structures of construction companies
Коммуникация Communication	25	Необходимость четкой координации между многочисленными подразделениями и подрядчиками для безопасности и соблюдения сроков The need for clear coordination between multiple departments and contractors for safety and meeting deadlines
Ресурсы Resources	20	Высокая ресурсоемкость строительной деятельности и программ организационных изменений The high resource intensity of construction activities and the organizational change programmes themselves
Инновации Innovation	15	Консервативность отрасли; восприимчивость важна для долгосрочного развития, но не является первичным драйвером изменений Industry conservatism; responsiveness is important for long-term development, but is not the primary driver of change
Сопротивление Resistance	10	Сопротивление рассматривается как следствие слабого лидерства и коммуникаций, а не как независимый первичный фактор Resistance is seen as a consequence of weak leadership and communication, rather than as an independent primary factor

Коэффициент культуры безопасности труда (ККБТ)

Показатель для мониторинга ключевого аспекта культуры в строительстве:

$$ККБТ = \sqrt{\frac{(БП \cdot ОБ \cdot КС)}{НС + 1}} \cdot \left(\frac{10}{\ln(BP + 1)} \right), \quad (2)$$

где БП — количество внедренных безопасных практик; ОБ — часы обучения безопасности; КС — количество сообщений об инцидентах/рисках; НС — количество несчастных случаев; ВР — общее количество человеко-часов.

Использование квадратного корня и логарифма дает возможность сглаживать экстремальные значения и повышает чувствительность показателя.

Индекс командной эффективности (ИКЭ)

Показатель для оценки проектного взаимодействия:

$$ИКЭ = \left(\frac{СП}{ПП} \cdot 50 \right) + \left(\frac{КК + УК}{2} \cdot 5 \right), \quad (3)$$

где СП/ПП — доля проектов, сданных в срок; КК — качество коммуникации в команде (0–10); УК — уровень кооперации между отделами (0–10).

Значения: >80 — высокая эффективность; 60–79 — хорошая; 40–59 — средняя (требуется улучшение); <40 — серьезные проблемы.

Скорость адаптации культуры (САК)

Показатель для оценки динамики внедрения новых норм:

$$САК = \frac{НП \cdot ВИ}{ВА \cdot (СИ + 1)} \cdot \frac{1}{К}, \quad (4)$$

где НП — количество новых практик; ВИ — вовлеченность сотрудников (0–10); ВА — среднее время адаптации (недели); СИ — сопротивление изменениям (0–10); К — коэффициент масштаба компании (1 — малый; 1,5 — средний; 2 — крупный).

Интерпретация: >3 — быстрая адаптация; 2–3 — нормальная; 1–2 — медленная; <1 — стагнация.

Индекс устойчивости культурных изменений (ИУКИ)

Показатель для оценки долгосрочного эффекта:

$$ИУКИ = \left(\frac{ДИ \cdot 0,4 + КИ \cdot 0,6}{10} \right) \cdot \left(\frac{ОР + УУ}{2} \right) \times \left(\frac{\min(BP, 12)}{12} \right), \quad (5)$$

где ДИ/КИ — количество долго-/краткосрочных инициатив; ОР — оценка обратной связи от сотрудников (0–10); УУ — уровень удержания ключевого персонала (0–10); ВР — длительность программы изменений (мес, максимальная — 12).

Табл. 3. Результаты оценки компонентов готовности к трансформации в ООО «Максима»
Table 3. Results of the assessment of readiness components for transformation in “Maxima” LLC

Компонент Component	Среднее значение The average value	Стандартное отклонение Standard deviation	Минимум Minimum	Максимум Maximum	Уровень Level
Лидерство (Л) Leadership (L)	4,2	1,8	1,0	8,1	Низкий Low
Коммуникация (К) Communication (C)	3,7	1,9	1,2	7,8	Низкий Low
Ресурсы (Р) Resources (R)	5,1	1,6	2,1	8,3	Средний Average
Инновации (И) Innovation (I)	5,8	1,4	2,8	8,9	Средний Average
Соппротивление (С) Resistance (R)	4,8	1,7	1,5	8,2	Средний Average

Значения: 8–10 — изменения укоренились; 6–7,9 — умеренная устойчивость; 4–5,9 — низкая устойчивость; <4 — высокий риск отката.

Апробация методического подхода
в ООО «Максима»

Для апробации был проведен опрос 145 сотрудников строительной компании ООО «Максима» (г. Мытищи). Выборка репрезентативно охватывала ключевые группы: руководящий состав (16,8 %), инженерно-технические работники (32,8 %), строительные рабочие (43,5 %), административный персонал (6,9 %).

Результаты оценки компонентов ИГТ представлены в табл. 3.

Данные выявили критически низкий уровень восприятия лидерства (4,2) и коммуникаций (3,7), что указывает на системные проблемы в управлении. При этом отмечается относительно высокая инновационная восприимчивость персонала (5,8).

Расчет интегрального ИГТ для ООО «Максима»:

$$\begin{aligned} \text{ИГТ} &= (0,3 \cdot 4,2) + (0,25 \cdot 3,7) + (0,2 \cdot 5,1) + \\ &+ (0,15 \cdot 5,8) + 0,1 \cdot (10 - 4,8) = 1,26 + 0,925 + \\ &+ 1,02 + 0,87 + 0,52 = 4,595. \end{aligned}$$

Полученное значение 4,6 балла соответствует зоне «необходима подготовительная работа». Это указывает на высокий риск неудачи при немедленном начале радикальных преобразований. Приоритетными направлениями для подготовительного этапа должны стать: развитие лидерских компетенций менеджеров, построение прозрачной системы коммуникаций и обратной связи, а также реализация пилотных проектов изменений для снижения уровня сопротивления на фоне имеющейся инновационной восприимчивости.

Апробация подтвердила практическую применимость и диагностическую ценность разработанного подхода. Выявленная структура проблем (слабые лидерство/коммуникации при относительно сильной инновационной восприимчивости) характерна для многих средних строительных компаний,

находящихся на этапе роста. Предложенная система переводит субъективное восприятие культуры в объективные, измеримые показатели, позволяя:

1. Диагностировать исходную точку и определять тип изменений (радикальные/постепенные).
2. Мониторировать динамику процесса, особенно в критических областях (безопасность, командная работа).
3. Оценивать долгосрочную эффективность и устойчивость произведенных изменений.

Научная новизна состоит в создании специализированного количественного инструментария, адаптированного к проектному, ресурсоемкому и высокорисковому контексту строительной отрасли. Дальнейшие исследования должны быть направлены на валидацию на более широкой выборке компаний различного масштаба и профиля, а также на разработку программного обеспечения для автоматизации расчетов и формирования аналитических отчетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование успешно разрешает выявленную научную проблему, заключающуюся в противоречии между общепризнанной стратегической значимостью корпоративной культуры для устойчивого развития строительных организаций и дефицитом научно обоснованных методических решений для управления ее целенаправленной трансформацией. Цель исследования — разработка методического подхода к оценке готовности — достигнута, что подтверждается системой показателей, отражающих полученные результаты.

Основным научно-практическим результатом работы является разработка комплексного методического подхода, реализованного в виде системы из пяти взаимосвязанных ключевых показателей. Каждый показатель предназначен для количественной оценки ключевого аспекта трансформационного процесса с учетом отраслевой специфики строительства:

- индекс готовности к трансформации (ИГТ) для первичной диагностики;

- коэффициент культуры безопасности труда (ККБТ) для мониторинга критически важного аспекта;
- индекс командной эффективности (ИКЭ) для оценки проектного взаимодействия;
- скорость адаптации культуры (САК) для отслеживания динамики;
- индекс устойчивости культурных изменений (ИУКИ) для долгосрочного контроля.

Интеграция этих показателей в единый контур управления обеспечивает сквозную оценку — от диагностики исходного состояния до закрепления результатов.

Эмпирическая апробация подхода на базе ООО «Максима» (г. Мытищи) подтвердила его высокую диагностическую ценность и практическую применимость. Расчетное значение ИГТ = 4,6 балла объективно отразило низкий исходный уровень готовности организации к изменениям, отнеся ее к зоне, где необходима масштабная подготовительная работа. Детальный анализ компонентов готовности строительной организации к трансформации выявил критические проблемные области: низкие оценки лидерства (4,2 балла) и коммуникаций (3,7 балла) при относительно высоком потенциале инновационной восприимчивости (5,8 балла). Этот дисбаланс предоставляет четкое направление для управленческого вмешательства: использование существующей открытости к новому для компенсации дефицитов в управлении и информировании.

Научная новизна исследования заключается в создании специализированного количественного инструментария, адаптированного к проектному, ресурсоемкому и высокорисковому контексту строительной отрасли. Предложенный подход преодолевает фрагментарность существующих исследований, интегрируя управленческий, процессный и социально-психологический аспекты в единую методическую систему для поэтапной оценки трансформации.

Практическая значимость определяется тем, что разработанная система показателей переводит субъективное восприятие корпоративной культуры в объективные, измеримые показатели. Это позволяет руководству строительных компаний:

1. Диагностировать текущую ситуацию и обоснованно выбирать стратегию изменений (радикальную или эволюционную).
2. Приоритизировать усилия и ресурсы, фокусируясь на ключевых «узких местах» (например, лидерство и коммуникации, как показал кейс ООО «Максима»).
3. Мониторить динамику процесса в реальном времени, особенно по критическим параметрам безопасности и командной работы.

4. Оценивать долгосрочную отдачу от инвестиций в изменения через показатель устойчивости (ИУКИ).

На основе результатов апробации сформулированы практические рекомендации для строительных организаций, начинающих трансформацию:

- на подготовительном этапе следует сфокусироваться на развитии лидерских компетенций среднего и высшего менеджмента и построении прозрачных, диалоговых коммуникационных каналов;
- высокую инновационную восприимчивость персонала целесообразно использовать как драйвер, внедряя пилотные цифровые инструменты и новые практики, которые демонстрируют быстрые выгоды и формируют позитивный опыт изменений [28, 29];
- необходимо внедрить регулярный (ежемесячный/квартальный) мониторинг ключевых индикаторов (ККБТ, ИКЭ, САК) для оперативной корректировки программы трансформации.

Ограничения и перспективы дальнейших исследований. Основным ограничением настоящего исследования является апробация подхода на единственной организации, что требует расширения эмпирической базы для подтверждения внешней валидности и надежности. Перспективные направления для развития работы:

1. Валидация на широкой выборке: проверка устойчивости и универсальности на репрезентативной выборке строительных компаний разного масштаба, специализации и географии.
2. Учет внешнего контекста: интеграция в показатели факторов макроэкономической среды, регуляторных изменений и колебаний рынка труда, оказывающих давление на организацию.
3. Адаптация к новым формам труда: исследование специфики трансформации культуры в условиях распространения гибридного и удаленного форматов работы в проектных командах.
4. Разработка цифрового инструмента: создание программного модуля или дашборда для автоматизации сбора данных, расчета индексов и визуализации результатов, что повысит удобство внедрения методики.

Таким образом, настоящее исследование вносит вклад как в теорию управления организационными изменениями в отраслевом контексте, так и в практику менеджмента строительных компаний. Разработанный методический подход формирует основу для перехода от интуитивного управления корпоративной культурой к управлению, основанному на данных, что способствует повышению эффективности, снижению рисков и укреплению долгосрочной конкурентоспособности организаций в динамичной среде строительной отрасли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Агошков А.И., Курочкин П.А. О возможностях повышения безопасности труда на основе совершенствования форм и методов управления трудовым поведением работников (на примере крупных инвестиционных строительных проектов) // XXI век. Техносферная безопасность. 2023. Т. 8. № 2 (30). С. 156–167. DOI: 10.21285/2500-1582-2023-2-156-167. EDN RURWMI.
2. Кузнецов В.В., Аверьянова Е.В., Воробьев В.К., Костюк Д.Д. К вопросу формирования корпоративной культуры будущих строителей // Вестник Оренбургского государственного университета. 2020. № 5 (228). С. 107–113. DOI: 10.25198/1814-6457-228-107. EDN ZJQIAQ.
3. Бортник Я.Е. Управление персоналом в строительной отрасли // Вектор экономики. 2024. № 3 (93). EDN MAIKRR.
4. Барахтенко И.М., Литвинова О.В. Пути совершенствования системы управления персоналом в строительной отрасли // Молодежный вестник ИРГТУ. 2020. Т. 10. № 3. С. 47–54. EDN UITGOB.
5. Цветкова А.А., Кузьмичева Д.В. Развитие персонала строительной организации на примере группы «ПИК» // Modern Science. 2022. № 4–2. С. 116–120. EDN KGPJQU.
6. Cherian J., Gaikar V., Paul R., Pech R. Corporate Culture and Its Impact on Employees' Attitude, Performance, Productivity, and Behavior: An Investigative Analysis from Selected Organizations of the United Arab Emirates (UAE) // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. 2021. Vol. 7. Issue 1. P. 45. DOI: 10.3390/joitmc7010045
7. Джуматова Ж.К. Теоретические и прикладные аспекты управления социально-экономическими системами // Управление персоналом: реалии настоящего и возможности будущего. 2024. С. 407–410.
8. Sadikova M.A., Umarxodjayeva M.G., Akramova N.I., Yusupov A.R. The transformation of organizational culture to corporate culture in joint stock companies // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 401. P. 03055. DOI: 10.1051/e3sconf/202340103055. EDN OKYYXA.
9. Михайлова Ю.А. Трансформация корпоративной культуры предприятия: путь к культуре успеха // Экономический форум : сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 21–25. EDN FWSRMG.
10. Mulakhmetov K.S., Sadriev R.D., Akhmetshin E.M. Corporate culture in management systems // European Research Studies Journal. 2018. Vol. 21. Issue 1. Pp. 519–528. EDN XXQWDB.
11. Magomedbekov G.U. Corporate culture of the enterprise and its use in project management // European Journal of Natural History. 2019. Issue 6. Pp. 2–4. EDN VVHLZA.
12. Gorton G.B., Grennan J., Zentefis A.K. Corporate Culture // Annual Review of Financial Economics. 2022. Vol. 14. Issue 1. Pp. 535–561. DOI: 10.1146/annurev-financial-092321-124541. EDN ZLDFVL.
13. Супрун А.Р., Таскаева Н.Н. Базовые основы разработки корпоративной культуры строительного предприятия // Финансовая экономика. 2024. № 8. С. 74–78. EDN MIPTAN.
14. Концевой С.И. Развитие корпоративной культуры в строительной организации, с использованием ТИМ (Технологии информационного моделирования) // Вестник науки. 2024. Т. 1. № 12 (81). С. 167–174. EDN PARJCX.
15. Богомолова Е.В., Кот Ю.А., Никифорова Е.А., Петренко Е.С. Антикризисные трансформации корпоративной культуры российских компаний во время пандемии COVID-19 // Социологический журнал. 2021. Т. 27. № 4. С. 53–71. DOI: 10.19181/socjour.2021.27.4.8644. EDN XNMWNM.
16. Панибратов Ю.П., Кошечев В.А., Козаков Р.Р. Развитие корпоративной культуры строительных организаций как фактор повышения конкурентоспособности // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 6 (89). С. 214–221. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-6-214-221. EDN HMIXRK.
17. Makeeva E.E. Особенности построения корпоративной культуры в организации в условиях цифровой трансформации // Современные исследования проблем управления кадровыми ресурсами : сб. науч. ст. IX Междунар. науч.-практ. конф. 2024. С. 95–99. EDN WGVPCP.
18. Копылова Н.Ю., Кишинская Т.А. Проблемы формирования корпоративной культуры организации // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2023. Т. 13. № 10–1. С. 651–657. DOI: 10.34670/AR.2023.25.92.084. EDN EAJLHC.
19. Смирнов Д.В. Управление мотивацией персонала по ключевым показателям деятельности (KPI) в строительной организации // Путевой навигатор. 2020. № 44 (70). С. 16–21. EDN MASTXU.
20. Малышева О.Л. Трансформации российской корпоративной культуры: от неолиберального дискурса к неотрадиционализму? // Управление устойчивым развитием. 2019. № 2 (21). С. 64–71. EDN IVTNPT.
21. Демченко Е.А. Трансформация корпоративной культуры как часть стратегии компании // Россия – Евразия – мир: интеграция – развитие – перспектива : мат. XIV Евраз. эконом. форума молодежи. 2024. С. 234–236. EDN EBECRP.
22. Зотов Ф.П. Подходы к преобразованию корпоративной культуры российского предприятия как формы развития системы управления // Управленческие науки. 2020. Т. 10. № 2. С. 88–98. DOI: 10.26794/2404-022X-2020-10-2-88-98. EDN BPTYGS.
23. Колесников А.В. Корпоративная культура : учебник и практикум для вузов. М. : Юрайт, 2024. 167 с.
24. Schein E.H. Organizational Culture and Leadership. New Jersey : Wiley, 2017. 416 p.

25. Cameron K.S., Quinn R.E. Diagnosing and changing organizational culture: based on the competing values framework. 3rd ed. San Francisco : Jossey-Bass, 2011.

26. Lewin K. Frontiers in group dynamics. Concept, method and reality in social science; social equilibria and social change // Human Relations. 1947. Vol. 1. Issue 1. Pp. 5–41. DOI: 10.1177/001872674700100103. EDN JMIIRCL.

27. Kotter J.P. Leading change. Boston : Harvard Business Review Press, 1996.

28. Свистунов В.М., Лобачев В.В., Кузина Г.П. Неизбежность трансформации корпоративной культуры компании в условиях перехода на новые технологии менеджмента // Управление персоналом и интеллектуальными ресурсами в России. 2022. Т. 11. № 1. С. 9–15. DOI: 10.12737/2305-7807-2022-11-1-9-15. EDN KQFTUV.

29. Малышева А.Ф. Особенности разработки стратегии управления человеческими ресурсами в строительной организации // Синергия наук. 2020. № 47. С. 21–28. EDN TALXWL.

Поступила в редакцию 22 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 27 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 27 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Романович Супрун — аспирант кафедры менеджмента и инноваций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8621-3867, ORCID: 0009-0008-4986-3110; aleksandr.suprun28@mail.ru;

Наталья Николаевна Таскаева — 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: 656124, Scopus: 56184060300, ResearcherID: V-4494-2018, ORCID: 0000-0002-1792-0562; natalia.taskaeva@yandex.ru.

Вклад авторов:

Супрун А.Р. — идея, сбор и обработка материала, написание статьи, итоговые выводы.

Таскаева Н.Н. — научное руководство, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Agoshkov A.I., Kurochkin P.A. On possibilities of improving labor safety by improving forms and methods of managing labor behavior (on the example of large investment construction projects). XXI century. *Technosphere safety*. 2023; 8(2):(30):156-167. DOI: 10.21285/2500-1582-2023-2-156-167. EDN RURWMI. (rus.).

2. Kuznetsov B.B., Averyanova E.B., Vorobyov B.K., Kostyuk D.D. To the issue of formation of corporate culture of future builders. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2020; 5(228):107-113. DOI: 10.25198/1814-6457-228-107. EDN ZJQIAQ. (rus.).

3. Bortnik Ya.E. Personnel management in the construction industry. *Vector of Economics*. 2024; 3(93). EDN MAIKRR. (rus.).

4. Barakhtenko I.M., Litvinova O.V. Ways to improve the personnel management system in construction industry. *ISTU Bulletin of Youth*. 2020; 10(3):47-54. EDN UITGOB. (rus.).

5. Tsvetkova A.A., Kuzmicheva D.V. Personnel development of a construction organization using the example of the PIK group. *Modern Science*. 2022; 4-2:116-120. EDN KGPJQU. (rus.).

6. Cherian J., Gaikar V., Paul R., Pech R. Corporate Culture and Its Impact on Employees' Attitude, Performance, Productivity, and Behavior: An Investigative Analysis from Selected Organizations of the United Arab Emirates (UAE). *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2021; 7(1):45. DOI: 10.3390/joitmc7010045

7. Dzhumatova J.K. Theoretical and applied aspects of managing socio-economic systems. *Personnel management: the realities of the present and the possibilities of the future*. 2024; 407-410. (rus.).

8. Sadikova M.A., Umarxodjayeva M.G., Akramova N.I., Yusupov A.R. The transformation of organizational culture to corporate culture in joint stock companies. *E3S Web of Conferences*. 2023; 401:03055. DOI: 10.1051/e3sconf/202340103055. EDN OKYYXA.

9. Mikhaylova Yu.A. Transformation of the company's corporate culture: the path to a culture of success. *Economic Forum : collection of articles from the II International scientific and practical conference*. 2020; 21-25. EDN FWSRMG. (rus.).

10. Mulakhmetov K.S., Sadriev R.D., Akhmetshin E.M. Corporate culture in management systems. *European Research Studies Journal*. 2018; 21(1):519-528. EDN XXQWDB.
11. Magomedbekov G.U. Corporate culture of the enterprise and its use in project management. *European Journal of Natural History*. 2019; 6:2-4. EDN VWHLZA.
12. Gorton G.B., Grennan J., Zentefis A.K. Corporate Culture. *Annual Review of Financial Economics*. 2022; 14(1):535-561. DOI: 10.1146/annurev-financial-092321-124541. EDN ZLDFVL.
13. Suprun A.R., Taskaeva N.N. Basic principles of developing a corporate culture of a construction enterprise. *Financial Economy*. 2024; 8:74-78. EDN MIPTAN. (rus.).
14. Kontsevov S.I. Development of corporate culture in construction organization, using TIM (information modeling technology). *Science Bulletin*. 2024; 1(1):2(81):167-174. EDN PARJCX. (rus.).
15. Bogomolova E.V., Kot Yu.A., Nikiforova E.A., Petrenko E.S. Anti-crisis transformation of corporate culture in Russian companies during the COVID-19 pandemic. *Sociological Journal*. 2021; 27(4):53-71. DOI: 10.19181/socjour.2021.27.4.8644. EDN XNMWNM. (rus.).
16. Panibratov Yu.P., Koshcheev V.A., Kozakov R.R. Development of corporate culture of construction organizations as a factor of increasing competitiveness. *Bulletin of Civil Engineers*. 2021; 6(89):214-221. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-6-214-221. EDN HMIXRK. (rus.).
17. Makeeva E.E. Features of building corporate culture in organizations during the digital transformation. *Modern studies of human resource management problems : collection of scientific articles of the IX International Scientific and Practical Conference*. 2024; 95-99. EDN WGVPCP. (rus.).
18. Kopylova N.Yu., Kishinskaya T.A. Problems of formation of corporate culture of the organization. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2023; 13(10-1):651-657. DOI: 10.34670/AR.2023.25.92.084. EDN EAJLHC. (rus.).
19. Smirnov D.V. Personnel motivation management by key performance indicators (KPIs) in a construction organization. *Travel Navigator*. 2020; 44(70):16-21. EDN MASTXU. (rus.).
20. Malysheva O.L. Transformations of Russian corporate culture: from neoliberal discourse to neo-traditionalism? *Managing Sustainable Development*. 2019; 2(21):64-71. EDN IVTNPT. (rus.).
21. Demchenko E.A. Transformation of corporate culture as part of the company's strategy. *Russia – Eurasia – the world: integration – development – prospect : materials of the XIV Eurasian Economic Youth Forum*. 2024; 234-236. EDN EBECRP. (rus.).
22. Zotov F.P. Approaches to transforming the corporate culture of a Russian enterprise as a form of the management system development. *Management Sciences*. 2020; 10(2):88-98. DOI: 10.26794/2404-022X-2020-10-2-88-98. EDN BPTYGS. (rus.).
23. Kolesnikov A.V. *Corporate culture : textbook*. Moscow, Yurait, 2024; 167. (rus.).
24. Schein E.H. *Organizational Culture and Leadership*. New Jersey, Wiley, 2017; 416.
25. Cameron K.S., Quinn R.E. *Diagnosing and changing organizational culture: based on the competing values framework*. 3rd ed. San Francisco, Jossey-Bass, 2011.
26. Lewin K. Frontiers in group dynamics. Concept, method and reality in social science; social equilibria and social change. *Human Relations*. 1947; 1(1):5-41. DOI: 10.1177/001872674700100103. EDN JMIRCL.
27. Kotter J.P. *Leading change*. Boston, Harvard Business Review Press, 1996.
28. Svistunov V., Lobachyev V., Kuzina G. Inevitability of company's corporate culture transformation under conditions of new management technologies. *Management of the Personnel and Intellectual Resources in Russia*. 2022; 11(1):9-15. DOI: 10.12737/2305-7807-2022-11-1-9-15. EDN KQFTUV. (rus.).
29. Malysheva A.F. Features of development of a human resource management strategy in a construction organization. *Synergy of Sciences*. 2020; 47:21-28. EDN TALXWL. (rus.).

Received December 22, 2025.

Adopted in revised form on December 27, 2025.

Approved for publication on December 27, 2025.

BIONOTES: Alexander R. Suprun — postgraduate student of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8621-3867, ORCID: 0009-0008-4986-3110; aleksandr.suprun28@mail.ru;

Natalia N. Taskaeva — 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 RSCI: 656124, Scopus: 56184060300, ResearcherID: V-4494-2018, ORCID: 0000-0002-1792-0562; natalia.taskaeva@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Alexander R. Suprun — idea, collection of material, processing of material, writing of the article, final conclusions.

Natalia N. Taskaeva — scientific guidance, scientific text editing.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Автоматизация формирования исполнительной документации на основе цифровой информационной модели

Елена Владиславовна Кац¹, Алина Владимировна Суворова²

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

² *Московский архитектурно-художественный проектный институт имени академика Полянского (МАХПИ имени академика Полянского); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Исполнительная документация (ИД), в том числе акты освидетельствования скрытых работ (АОСР), является ключевым элементом строительного контроля, обеспечивающим подтверждение качества и соответствия выполненных работ проектной и нормативной документации. В условиях цифровизации строительной отрасли и внедрения технологий информационного моделирования актуальной становится задача снижения трудоемкости и ошибок при подготовке исполнительных документов. Несмотря на развитие информационного моделирования, практические решения по автоматическому формированию содержания актов на основе цифровой информационной модели (ЦИМ) остаются недостаточно разработанными. Цель исследования — разработка и экспериментальная проверка подхода к автоматизации формирования АОСР на основе ЦИМ, связанной с календарно-сетевым планом (КСП) (4D-ЦИМ).

Материалы и методы. В качестве исходных данных использованы ЦИМ здания в формате IFC, КСП строительства и спецификации материалов в табличном виде. Применены методы анализа данных информационной модели, логического сопоставления элементов ЦИМ и работ календарного плана, а также алгоритмическая обработка сведений с использованием языка Python и открытых форматов обмена.

Результаты. Разработаны модель данных и алгоритм автоматического заполнения ключевых полей АОСР. Реализован программный прототип генератора актов, проведена его апробация на пилотных объектах. Получены количественные показатели эффективности, демонстрирующие сокращение времени подготовки одного акта в 3–4 раза, снижение числа ошибок до единичных случаев и достижение уровня автозаполнения порядка 90 % по сравнению с традиционными и специализированными программными подходами.

Выводы. Результаты подтверждают целесообразность использования 4D-ЦИМ для автоматизации формирования ИД. Предложенный подход повышает достоверность и прозрачность актов, снижает влияние человеческого фактора и может быть рекомендован для внедрения в практику строительного контроля и в среды общих данных строительных проектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: исполнительная документация, акт освидетельствования скрытых работ, цифровая информационная модель, 4D-моделирование, календарно-сетевой план, автоматизация документооборота, ТИМ, BIM-технологии, строительный контроль

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кац Е.В., Суворова А.В. Автоматизация формирования исполнительной документации на основе цифровой информационной модели // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 4. С. 652–666. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.652-666

Автор, ответственный за переписку: Елена Владиславовна Кац, MakishaEV@mgsu.ru.

Automation of as-built documentation generation based on a digital information model

Elena V. Kats¹, Alina V. Suvorova²

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

² *Moscow Architectural and Art Design Institute named after Academician Polyansky (MAKhPI named after Academician Polyansky); Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. As-built documentation, including As-Built Inspection Certificates for concealed works, is a critical element of construction control, ensuring verification of quality and compliance with design and regulatory requirements. In the context of construction industry digitalization and the adoption of building information modelling technologies, reducing labour intensity and errors in the preparation of as-built documents becomes an important task. Despite the development of information modelling, practical solutions for the automated generation of certificate content based on a digital information

model remain insufficiently developed. The purpose of this study is to develop and experimentally validate an approach to automating the generation of As-Built Inspection Certificates using a digital information model linked with a construction schedule (4D BIM).

Materials and methods. The study uses a building digital information model in IFC format, a construction schedule, and material specifications in tabular form as input data. The research applies methods of BIM data analysis, logical mapping between BIM elements and schedule activities, and algorithmic data processing using the Python programming language and open data exchange formats.

Results. A data model and an algorithm for automatic population of key fields of As-Built Inspection Certificates were developed. A software prototype of a certificate generator was implemented and tested on a pilot construction project. Quantitative performance indicators demonstrate a 3–4 times reduction in the time required to prepare a single certificate, a decrease in the number of errors to isolated cases, and an autofill completeness level of approximately 90 % compared to traditional spreadsheet-based and specialized software approaches.

Conclusions. The results confirm the feasibility and effectiveness of using 4D BIM for automating the preparation of as-built documentation. The proposed approach improves the reliability and transparency of certificates, reduces the impact of human factors, and can be recommended for implementation in construction control practice and common data environments of construction projects.

KEYWORDS: as-built documentation, As-Built Inspection Certificate, digital information model, BIM, 4D BIM, construction schedule, document automation, construction control

FOR CITATION: Kats E.V., Suvorova A.V. Automation of as-built documentation generation based on a digital information model. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(4):652-666. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.652-666 (rus.).

Corresponding author: Elena V. Kats, MakishaEV@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Исполнительная документация (ИД) в строительстве (включая акты освидетельствования скрытых работ — АОСР) играет ключевую роль в контроле качества и сроков строительства [1, 2]. Процесс подготовки АОСР традиционно осуществляется вручную или с использованием разрозненных средств, что сопряжено с большими затратами и рисками ошибок при заполнении [3, 4]. Существуют два основных подхода к автоматизации подготовки АОСР: табличные шаблоны (электронные таблицы) с формулами, предусматривающие значительный ручной ввод данных; специализированные программные системы ведения ИД. В первом случае, несмотря на частичную автоматизацию вычислений с помощью формул, ответственность за внесение всех исходных данных лежит на пользователе, и вероятность пропустить или неверно указать информацию остается высокой. Во втором случае (например, применение программ типа «Алтиус») акты могут генерироваться автоматически на основе ранее заполненного электронного общего журнала работ, однако исходные данные (журнал) все равно вводятся вручную, а интеграция с информационной моделью (ИМ) объекта отсутствует. Таким образом, ни табличные решения, ни имеющиеся коммерческие системы полностью не устраняют проблему дублирования ввода и не используют преимущества информационного моделирования.

Российская нормативная база стимулирует внедрение технологий информационного моделирования (ТИМ) в управление строительством, что отражается и на требованиях к ИД. В частности, Постановление Правительства РФ № 331 от

05.03.2021¹ обязывает формировать ИМ государственных заказчиков, а также иных технических заказчиков при строительстве многоквартирных домов, если проектная документация на них подлежит экспертизе, и при строительстве индивидуальных домов и малоэтажных комплексов, если для них разрабатывается проектная документация. Постановление Правительства РФ № 614 от 17.05.2024² устанавливает, что на этапе строительства ИД должна дополняться материалами из цифровой информационной модели (ЦИМ) объекта. Эти требования создают предпосылки для использования данных ЦИМ не только при проектировании, но и при оформлении исполнительных документов на этапе строительства.

4D-ЦИМ (3D-модель + календарно-сетевой график) дает возможность жестко связать элементы конструкции, стадии их возведения и время выполнения работ. Это значит, что на момент приемки или освидетельствования реально можно определить, какие элементы/работы были завершены, когда они завер-

¹ Об установлении случаев, при которых застройщиком, техническим заказчиком, лицом, обеспечивающим или осуществляющим подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицом, ответственным за эксплуатацию объекта капитального строительства, обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства (с изменениями и дополнениями) : Постановление Правительства РФ от 05.03.2021 № 331.

² Об утверждении Правил формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства, состава сведений, документов и материалов, включаемых в информационную модель объекта капитального строительства и представляемых в форме электронных документов, и требований к форматам указанных электронных документов : Постановление Правительства РФ от 17.05.2024 № 614.

шены и как они привязаны к модели, а не полагаться на бумажные или электронные журналы. 4D-модель позволяет автоматически отслеживать последовательность работ, видеть временную и пространственную привязку, выявлять фактическую готовность объектов — все сведения уже структурированы в модели. Это создает основу для автозаполнения актов: поля объемов, геометрии, этапов, дат можно вынести из модели и графика, что снизит трудозатраты, уменьшит ошибки ввода и повысит прозрачность ИД.

Несмотря на появление ТИМ-платформ с функционалом в части 4D [5–9], на сегодняшний день не реализовано программное решение для автозаполнения АОСР на базе 4D-ЦИМ. Существующие научные работы рассматривают вопросы ИД преимущественно с точки зрения регламента и истории развития форм актов [3, 4, 10–12] и улучшения процедур ведения документации [13–18]. В последние годы акцент смещается на цифровизацию ИД в контексте применения информационного строительства (ТИМ) [19–21]. Однако задача автоматического формирования содержания актов на основе данных ЦИМ, привязанной к календарному плану, остается недостаточно изученной. Гипотеза исследования состоит в том, что данные из 4D-ЦИМ позволят автоматически заполнять ключевые разделы

акта, тем самым снижая трудозатраты и вероятность ошибок при ведении ИД.

В рамках настоящей работы предложен соответствующий подход и поставлена цель экспериментально подтвердить его эффективность. Научный вклад статьи заключается в следующем:

- разработаны модель данных и алгоритм автогенерации полей АОСР из 4D-ЦИМ;
- реализован прототип генератора актов (Python) на основе открытых форматов (IFC, XML, XLSX);
- проведена апробация на пилотном объекте с количественной оценкой метрик времени подготовки акта, числа ошибок и полноты автозаполнения;
- выполнено сравнение с традиционным табличным методом и промышленной системой ведения ИД.

Эти результаты демонстрируют возможность практической реализации требований стандартов серии ISO 19650 при формировании исполнительной документации за счет средств ТИМ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обзор подходов к автоматизации формирования АОСР

Табличные подходы

Распространенным способом является использование электронных таблиц (Excel) для ведения актов. Разрабатываются шаблоны АОСР с формулами,

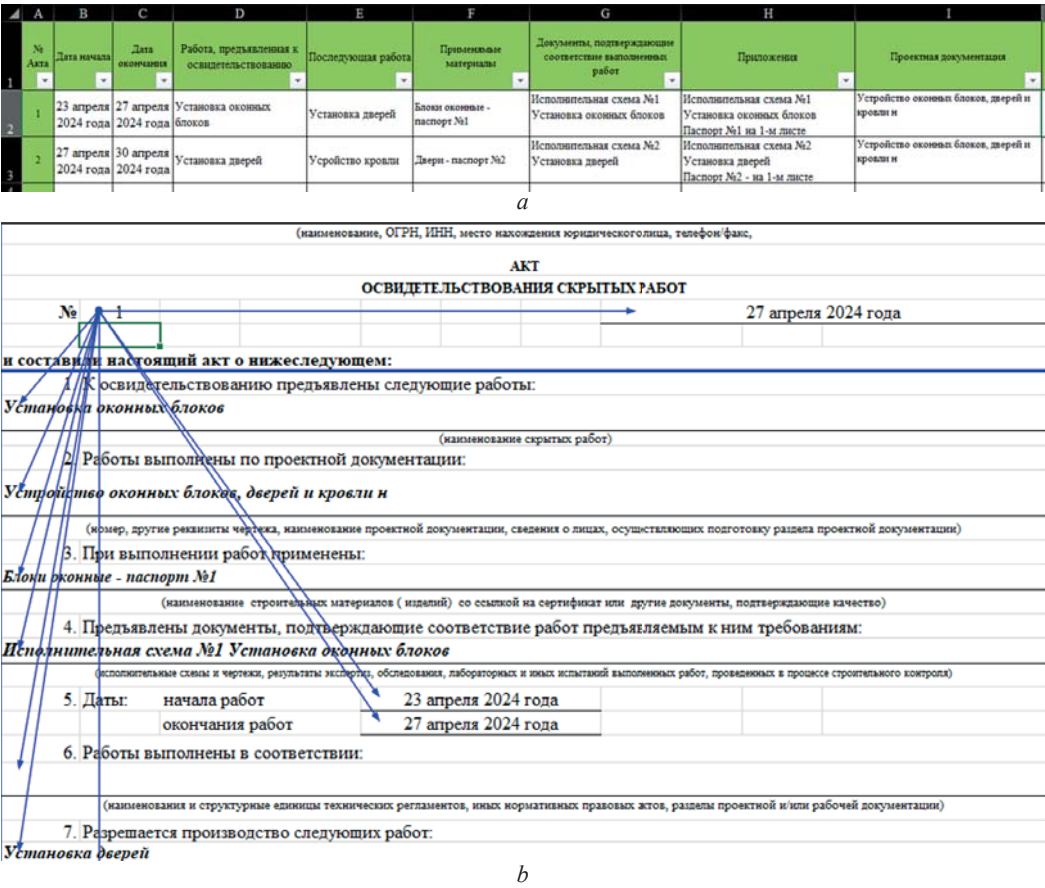


Рис. 1. Применение электронных таблиц для формирования АОСР: а — часть 1; b — часть 2

Fig. 1. Use of spreadsheets for the preparation of As-Built Inspection Certificates: a — part 1; b — part 2

Рис. 2. Интерфейс специализированной системы «Алтиус» для ведения исполнительной документации

Fig. 2. Interface of the specialized system Altius for as-built documentation management

позволяющие при вводе исходных данных автоматически рассчитывать некоторые итоговые показатели. Однако строгих унифицированных правил для такого шаблона не установлено. В качестве примера на рис. 1 показан фрагмент заполнения акта с помощью табличного редактора: все ключевые сведения (перечень работ, даты, материалы, документы и прочее) вводятся вручную в лист «Рабочий процесс», откуда с помощью формул типа ВПР и логических условий они транслируются в форму акта. Хотя подобный инструмент повышает скорость расчетов, доля ручного труда остается высокой — каждый новый акт требует внесения значительного объема информации. Кроме того, при усложнении проекта (увеличении числа актов) масштабируемость такого решения падает, а риск ошибок, связанных с нарушением формул или неверным сопоставлением данных, возрастает прямо пропорционально количеству работ. Практический вывод, отмеченный авторами и другими исследователями: табличные методы целесообразны лишь для небольших объектов с ограниченным числом актов, где затраты на разработку и поддержку шаблона невелики.

Специализированные системы ИД

Существуют программные комплексы, предназначенные для ведения ИД в строительстве. Пример — система «Алтиус», интерфейс которой представлен на рис. 2. Она реализует принцип однократного ввода: заполнив единый электронный журнал работ, пользователь может автоматически сгенерировать акты (АОСР) по всем выбранным записям. Подобные си-

стемы значительно упрощают оформление документации: автоматически проставляются номера актов, даты, подставляются сведения о подрядчике и т.д. Однако, несмотря на ускорение выпуска актов, исходные данные — сведения о выполненных работах — так же вносятся вручную оператором в журнал. Кроме того, такие системы, как правило, слабо интегрированы с ЦИМ: отсутствует автоматический импорт сведений из ИМ или смет. В литературе отмечается актуальность интеграции специализированных систем ИД с BIM-платформами и проектными данными, но готовых решений на момент проведения исследования не выявлено.

ТИМ-ориентированные подходы (4D/5D)

Интеграция информационных моделей с календарным планом (4D-моделирование) открывает новые возможности для автоматического формирования документов. Вместе с тем появляются отечественные программные продукты, интегрирующие ЦИМ с календарным графиком, например 7D Modeler и Plan-R. Такие программы позволяют связать элементы модели с задачами плана, назначить им сроки и визуализировать ход строительства (рис. 3). Однако до сегодняшнего дня указанные решения не обеспечивали автоматического формирования ИД. Настоящее исследование, по сути, развивает направление ТИМ-ориентированной автоматизации документооборота, дополняя его конкретным приложением — генерацией АОСР.

Объект исследования и данные

Разработанный подход апробирован на трех проектах — жилые здания общей площадью 5000,

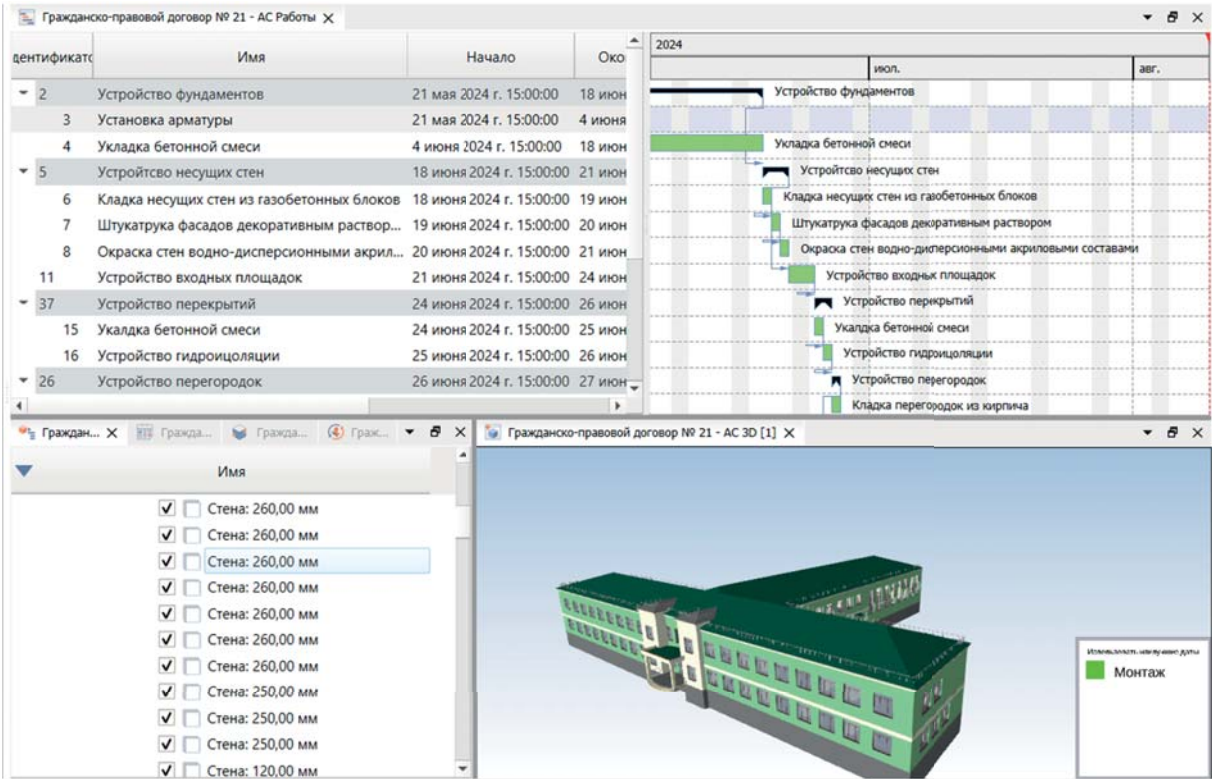


Рис. 3. Интеграция модели здания и календарно-сетевых плана в среде 7D Modeler (пример связи элементов ЦИМ с задачами графика)

Fig. 3. Integration of the building information model and the construction schedule in the 7D Modeler environment (example of linking BIM elements with schedule tasks)

15 000, 60 000 м². В рамках исследования оформлено *N* актов (АОСР) по *M* видам скрытых работ для каждого объекта. Использовались следующие исходные данные:

- цифровая информационная модель здания в формате IFC4 (экспорт из ТИМ-платформы Renga);
- календарно-сетевой план (КСП) строительства с привязкой к ЦИМ в формате XML (создан в системе планирования 7D Modeler);
- спецификации материалов по элементам здания в формате XLSX (сформированы средствами Renga).

Программная среда и форматы

В качестве ТИМ-платформы для создания и хранения ИМ применена Renga (Renga Software, Россия). 4D-моделирование выполнялось в системе 7D Modeler (ООО «Открытые ТИМ системы», Россия). Алгоритмическая часть реализована на Python 3.10; ключевые библиотеки: pandas 1.4 (обработка таблиц), IfcOpenShell 0.6 (чтение IFC) и openpyxl 3.0 (работа с Excel). Прототип генератора развернут на стандартном ПК (CPU Intel Core i5 3.2 ГГц, 16 ГБ ОЗУ) под управлением Windows 10. Обмен данными между компонентами осуществлялся в большей степени

Табл. 1. Соответствие между полями акта и атрибутами 4D-ЦИМ (ЦИМ + КСП)

Table 1. Mapping between As-Built Inspection Certificates fields and 4D BIM (BIM + construction schedule) attributes

Поле АОСР As-Built Inspection Certificates Field	Источник данных Data Source	Правило заполнения Population Rule	Проверки (валидация) Checks (Validation)
Наименование работы Work name	Таблица работ (4D-модель, .xml) Work table (4D model, .xml)	Наименование работы автоматически подставляется из строки календарного плана, соответствующей формируемому акту. Связь осуществляется по идентификатору работы The work name is automatically populated from the construction schedule row corresponding to the generated certificate. The linkage is established using the work identifier	Значение не должно быть пустым; наименование должно соответствовать выбранной работе The value must not be empty; the name must correspond to the selected work

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Поле АОСР As-Built Inspection Certificates Field	Источник данных Data Source	Правило заполнения Population Rule	Проверки (валидация) Checks (Validation)
Даты начала/окончания Start/finish dates	Таблица работ (4D-модель, .xml) Work table (4D model, .xml)	Даты начала и окончания берутся из календарного плана для соответствующей работы и копируются в акт без ручного ввода The start and finish dates are taken from the construction schedule for the corresponding work and copied into the certificate without manual input	Дата начала не позже даты окончания; корректный формат дат Start date must not be later than the finish date; correct date format
Применяемые материалы Materials used	Таблица материалов (ЦИМ, .xlsx) Materials table (BIM, .xlsx)	В акт автоматически включается перечень материалов, связанных с данной работой. Материалы подбираются на основе установленной связи: работа календарного плана → элемент ЦИМ → материал The certificate automatically includes the list of materials associated with the given work. Materials are selected based on the established linkage between construction schedule works and the materials specification	Согласованность единиц измерения; наличие материалов для работ, где это требуется Consistency of measurement units; availability of materials for works where they are required
Последующая работа Subsequent work	Таблица работ (4D-модель, .xml) Work table (4D model, .xml)	В акт подставляется информация о работе, выполнение которой допускается после завершения текущей. Данные определяются на основе связей между работами в календарном плане The certificate includes information on the work that is permitted to be performed after completion of the current one. The data are determined based on the dependency relationships in the construction schedule	Отсутствие циклических зависимостей; корректность логики последовательности Absence of cyclic dependencies; correctness of the sequence logic
Документы соответствия Compliance documents	Таблица материалов (ЦИМ, .xlsx) Materials table (BIM, .xlsx)	Документы качества (сертификаты, паспорта) автоматически подставляются для материалов, если информация о них содержится в спецификации. В остальных случаях сведения вводятся пользователем вручную Quality documents (certificates, passports) are automatically populated for materials if such information is available in the specification. In other cases, the data are entered manually by the user	Наличие документов для ответственных и регламентируемых работ Availability of documents for critical and regulated works

посредством открытых форматов: IFC (ЦИМ), XML (4D-модель), XLSX (спецификации и сгенерированные акты).

Модель данных

Для автоматического заполнения акта освидетельствования скрытых работ определены ключевые поля, источники данных для них и правила извлечения информации. В табл. 1 перечислены основные поля акта и соответствующие атрибуты из 4D-ЦИМ.

Информационная модель обеспечивает данные для большинства полей акта. Источниками являются свойства элементов модели, связанные работы плана и выгруженные спецификации материалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках исследования разработан алгоритм для сбора исходных сведений, необходимых для автоматизированного формирования АОСР с использованием информационного моделирования, который продемонстрирован на рис. 4.

На рис. 5 приведен разработанный алгоритм формирования АОСР, который лег в основу соответствующего автоматизированного генератора актов.

Для каждой работы алгоритм находит связанные элементы модели (по идентификатору), извлекает по ним материалы из спецификаций, формирует структуру записи акта и выполняет проверку корректности данных. Проверка включает контроль

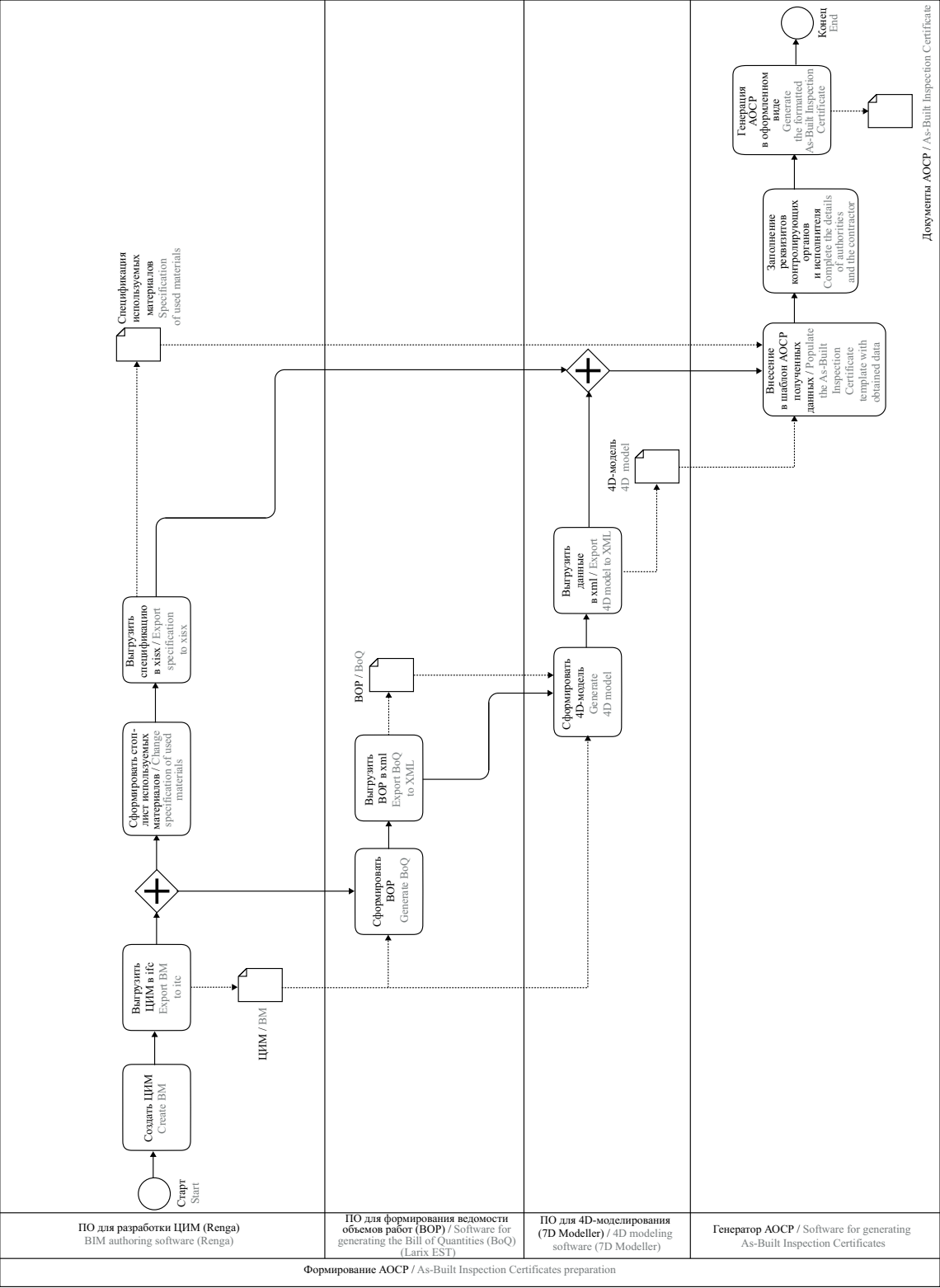


Рис. 4. Алгоритм сбора исходных данных, необходимых для автоматизированного формирования АОСР с использованием информационного моделирования
Fig. 4. Algorithm for preparing data required for the automated generation of As-Built Inspection Certificates using information modelling

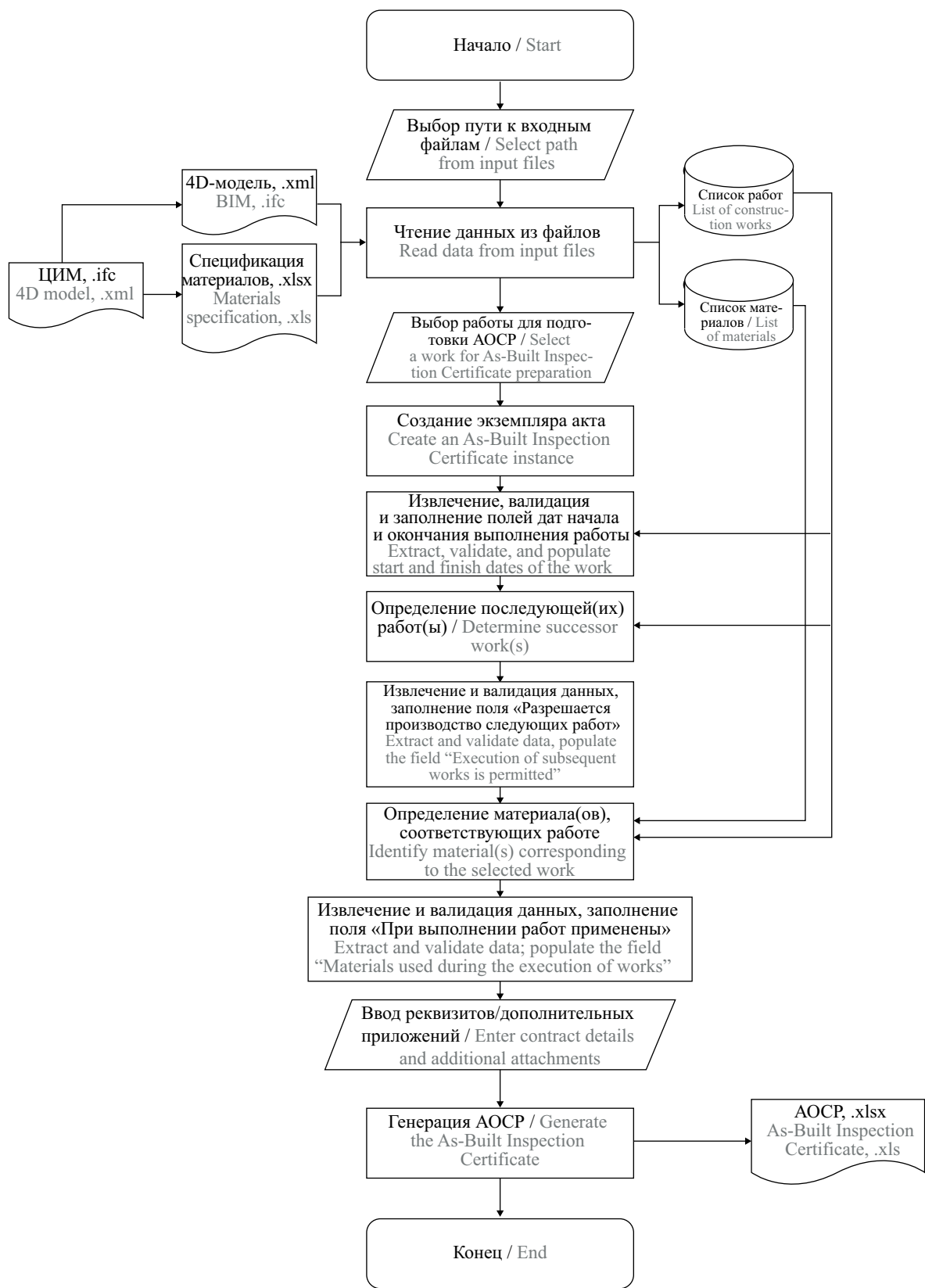


Рис. 5. Алгоритм формирования акта из интегрированных данных ЦИМ и КСП
Fig. 5. Algorithm for Automated Completion of As-Built Inspection Certificate

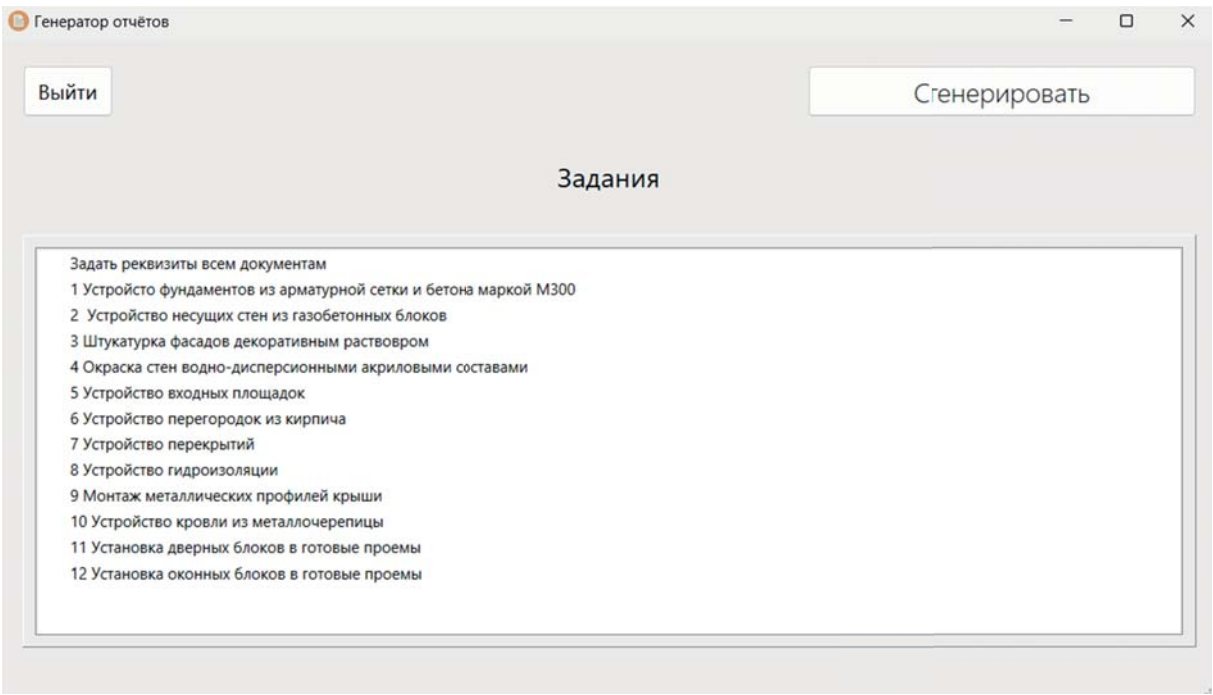


Рис. 6. Интерфейс генератора АОСР
Fig. 6. Interface of the As-Built Inspection Certificate generator

заполненности всех обязательных полей, проверку логических условий (например, даты в пределах проекта, наличие следующей работы, если она указана в плане). На выходе формируется акт в выбранном формате (в нашем случае XLSX).

На основе представленного алгоритма разработан прототип системы. На рис. 6 представлен интерфейс этой системы.

В качестве метрик для оценки эффективности предлагаемого подхода были выбраны: время подготовки одного акта, число ошибок/неточностей на один акт, полнота автозаполнения (доля полей, заполняемых автоматически) и доля ручной правки (процент полей, скорректированных вручную после автозаполнения).

Для количественной оценки результатов реализовано три сценария: S1 — небольшой проект (5000 м², ≤ 50 актов), S2 — средний (15 000 м², 50–200 актов) и S3 — крупный (60 000 м², > 200 актов). По каждому сценарию измерения проводились для трех способов генерации АОСР с применением: табличного подхода, специализированных систем и предлагаемого. Проверка корректности актов осуществлялась методом двойного контроля со стороны отдела ПТО и технадзора (двое независимых экспертов просматривали сгенерированные акты). В табл. 2 приведены используемые метрики и их интерпретация.

В табл. 3 сведены значения метрик для всех трех подходов (табличный, на основе специализированного ПО, предлагаемый) по трем видам объектов.

Табл. 2. Метрики эффективности для оценки предлагаемого подхода
Table 2. Efficiency metrics for evaluating the proposed approach

Метрика Metric	Описание Description	Примечания Notes
Время подготовки одного акта, T Time to prepare a single certificate, T	Время подготовки одного акта, мин Time required to prepare one certificate, min	Медианное значение по N актам Median value over N certificates
Число ошибок/неточностей на один акт, K Number of errors/inaccuracies per certificate, K	Количество исправлений после проверки, шт. Number of corrections identified after review, count	Выявлено экспертной валидацией Identified through expert validation
Полнота автозаполнения, % авто Autofill completeness, % auto	Доля полей акта, заполненных автоматически, % Share of certificate fields filled automatically, %	Относительно полного шаблона Relative to the complete certificate template
Доля ручной правки, % правки Manual editing share, % edit	Доля полей, откорректированных вручную, % Share of fields corrected manually, %	Чем ниже, тем лучше Lower values indicate better performance

Табл. 3. Сравнение методов по показателям эффективности (сценарии S1–S3)
Table 3. Comparison of methods by performance metrics (scenarios S1–S3)

Метод Method	Сценарий Scenario	T, мин min	K, шт. count	% авто auto	% правки edit
Табличный Table-based	S1	15	2	10	90
	S2	20	3	10	90
	S3	30	5	10	90
С применением специализированного ПО Specialized software-based	S1	10	1	50	50
	S2	15	2	50	50
	S3	20	3	50	50
Предлагаемый Proposed	S1	5	0	90	10
	S2	5	0	90	10
	S3	5	1	90	10

Приказ № /пр344 от 16.05.2023 Приложение 3

Объект капитального строительства:

Реконструкция Общеобразовательной школы №27 по адресу: Рязанская область

г. Михайлов, ул. Красный Октябрь, 44

(наименование проектной документации, почтовый или строительный адрес объекта капитального строительства)

Застройщик (технический заказчик, эксплуатирующая организация или региональный оператор):

Администрация г. Михайлов, ОГРН 1234567891011, ИНН 1234567890, РФ, г. Михайлов, ул. Мира, 80, тел. (383) 200-00-00,

(наименование, ОГРН, ИНН, место нахождения юридического лица, телефон/факс,

СРО А «Админитерация», ОГРН 1234567891011, ИНН 1234567890

(наименование, ОГРН, ИНН саморегулируемой организации, членом которой является)

Лицо, осуществляющее строительство:

ООО «Строители», ОГРН 1234567891011, ИНН 1234567890, РФ, г. Рязань, проспект Мира, 10, тел. (812) 777-77-77

(наименование, ОГРН, ИНН, место нахождения юридического лица, телефон/факс,

СРО А «Объединение строителей», ОГРН 1234567891011, ИНН 1234567890

(наименование, ОГРН, ИНН саморегулируемой организации, членом которой является)

Лицо, осуществляющее подготовку проектной документации:

ООО «Рязанский проектный институт», ОГРН 1234567891011, ИНН 1234567890, РФ, г. Рязань, ул. Почтовая, 11, тел. (499) 222-22-22,

(наименование, ОГРН, ИНН, место нахождения юридического лица, телефон/факс,

СРО А «Объединение проектировщиков», ОГРН 1234567891011, ИНН 1234567890

(наименование, ОГРН, ИНН саморегулируемой организации, членом которой является)

АКТ
ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЯ СКРЫТЫХ РАБОТ

№ 1 16 апреля 2023

Представитель застройщика (технического заказчика, эксплуатирующей организации или регионального оператора) по вопросам строительного контроля:

Руководитель группы строительного контроля Иванов П.И. идентификационный номер С-77-111111, приказ №01-СК от 10.04.2023

(должность, фамилия, инициалы, идентификационный номер в НРС в области строительства, реквизиты распорядительного документа, подтверждающего полномочия, с указанием наименования, ОГРН, ИНН, места нахождения юридического лица)

Представитель лица, осуществляющего строительство:

Начальник участка Петров П.П., приказ №02-СТ от 10.04.2023

(должность, фамилия, инициалы, реквизиты распорядительного документа, подтверждающего полномочия)

Представитель лица, осуществляющего строительство по вопросам строительного контроля (специалист по организации строительства):

Главный инженер Сергеев С.С., идентификационный номер С-11-111111, приказ №03-СТ от 10.04.2023

(должность, фамилия, инициалы, идентификационный номер в НРС в области строительства, реквизиты распорядительного документа, подтверждающего полномочия)

Представитель лица, осуществляющего подготовку проектной документации:

Главный инженер проекта Васильев В.В., приказ №01-АН от 10.04.2023 ООО «Авторский надзор», ОГРН 1234567891011, ИНН 1234567890, РФ, г. Рязань, ул. Почтовая, 80

(должность, фамилия, инициалы, реквизиты распорядительного документа, подтверждающего полномочия, с указанием наименования, ОГРН, ИНН, места нахождения юридического лица)

Представитель лица, выполнившего работы подлежащие освидетельствованию:

Производитель работ Семёнов С.С., приказ №04-СТ от 10.04.2023, ООО «Субподрядчик» ОГРН 1234567891011, ИНН 1234567890, РФ, Рязанская область, г. Михайлов, ул. Ленина 7

(должность, фамилия, инициалы, реквизиты распорядительного документа, подтверждающего полномочия, с указанием наименования, ОГРН, ИНН, места нахождения юридического лица)

а также иные представители лиц, участвующие в освидетельствовании:

(должность с указанием наименования организации, фамилия, инициалы, реквизиты распорядительного документа, подтверждающего полномочия)

произвели осмотр работ, выполненных: ООО "Субподрядчик"

(наименование лица, осуществляющего строительство, выполнившего работы)

$$b$$

Fig. 7. Fragment of the generated As-Built Inspection Certificate: *a* — part 1; *b* — part 2

проверки и исправления, тогда как автоматизированный генератор сохраняет показатель примерно 5 мин/акт даже при росте масштабов. Количество допущенных ошибок в предложенном методе стремится к нулю — за все тестовые прогоны эксперты не обнаружили критичных несоответствий, требующих исправления, лишь в единичных случаях потребовалась уточняющая правка формулировок (от-

разилось как 1 исправление в S3). Для сравнения, при ручном ведении по шаблону в каждом акте обнаруживалось в среднем 2–5 неточностей (пропуски, опечатки, рассинхронизация дат и т.д.). Полнота автозаполнения в предлагаемом подходе достигла 90 %: практически все поля были заполнены автоматически. В методе, основанном на применении специализированной системы, доля автозаполнения примерно 50 % — она охватывает структурные поля акта (номера, реквизиты), но не включает материалы и документацию, так как не задействована ЦИМ. Таким образом, предложенный ТИМ-ориентированный метод демонстрирует наивысшие показатели по всем метрикам во всех сценариях.

Отдельного внимания заслуживает пример сформированного акта, на рис. 7 показан автоматически сгенерированный АОСР для одного из видов работ. Как видно, документ полностью соответствует требуемой форме, содержит все необходимые сведения (название и период выполнения работы, сведения о материалах, последующей операции, документах соответствия и др.). Эти данные получены напрямую из модели и графика, что обеспечивает их консистентность с проектной документацией. Эксперты отметили высокое качество заполнения: автоматизация исключила пропуски важных полей и обеспечила единообразие оформления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное сравнение подтверждает эффективность интеграции данных ЦИМ и календарного плана для подготовки ИД. Выигрыш во времени (в 3–4 раза быстрее по сравнению с ручными методами) особенно важен при большом количестве актов, что соответствует реальным потребностям крупных проектов. Снижение числа ошибок указывает на повышение надежности документации: человеческий фактор практически устранен при переносе информации из проектных сведений в акт. В то же время применение предлагаемого подхода требует наличия качественной ИМ и корректного календарного графика. Если модель неполная или содержит неточно-

сти (например, не все элементы связаны с задачами, или неправильно указаны материалы), то автоматическая генерация актов может отражать эти недостатки. В эксперименте авторы добились 90 % автозаполнения; оставшиеся 10 % полей — это, как правило, то, что модель не хранит.

Следует отметить, что апробация выполнялась лишь на трех объектах, реальные проекты могут иметь дополнительные сложности (например, изменения проекта по ходу строительства, обновления модели, несколько параллельных моделей и графиков). Предложенный алгоритм пока предполагает наличие устойчивого маппинга между элементами модели и задачами КСП, заданного вручную. В будущем планируется автоматизировать эту связку, чтобы исключить даже разовую ручную работу по подготовке соответствий. Кроме того, авторы не учитывали вариативность форм актов: в исследовании применялась единая форма согласно приказу Минстроя от 16.05.2023 № 344/пр. В случае изменений формы (например, для других типов работ или ведомственной специфики) гибкость алгоритма предстоит проверить. Тем не менее заложенный принцип — отделение данных от шаблона и использование конфигурационных файлов для описания структуры акта — позволяет адаптировать генератор под новые форматы без значительных доработок кода.

Настоящее исследование демонстрирует, что объединение ЦИМ и КСП может значительно повысить эффективность строительного контроля за счет автоматизации документооборота. В перспективе это или подобное решение может стать частью среды общих данных (СОД) проекта. Кроме того, применение подобных генераторов актов может сопровождаться накоплением больших данных об ошибках и корректировках, что открывает возможности для внедрения элементов искусственного интеллекта — например, прогнозирования проблемных мест, требующих особого внимания инженера при вводе информации. Таким образом, работа закладывает фундамент для дальнейших исследований и разработок на стыке ТИМ и автоматизации управленческих процессов в строительстве.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Цона Н.В., Карпушкин А.С. Исполнительная документация в строительстве: состав и порядок ведения // Экономика строительства и природопользования. 2020. № 4 (77). С. 56–65. DOI: 10.37279/2519-4453-2020-4-56-65. EDN BHDEXC.
2. Шинкевич В.А., Коноплев С.Н. Исполнительная документация в строительстве. СПб. : ЦКС СПб, 2019. 346 с.
3. Карпушкин А.С. Акт освидетельствования скрытых работ. Часть 1: анализ истории развития формы и порядка ведения акта // Известия Тульского

государственного университета. Технические науки. 2021. № 10. С. 510–520. EDN WZWGSJ.

4. Карпушкин А.С. Акт освидетельствования скрытых работ. Часть 2: совершенствование формы и порядка ведения акта на примере зарубежных подходов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 10. С. 537–545. EDN IFMXQB.

5. Saad I.M.H., Batie D. The Science & Technology Building 4D Construction Model // ASEE Southeast Section Conference. 2020.

6. *Nechyporchuk Y., Baskova R.* The level of detail for 4D BIM modeling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1209. Issue 1. P. 012002. DOI: 10.1088/1757-899X/1209/1/012002
7. *Son H., Kim C., Cho Y.K.* Automated Schedule Updates Using As-Built Data and a 4D Building Information Model // Journal of Management in Engineering. 2017. Vol. 33. Issue 4. DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000528
8. *Rehman I.U., Mazher K.M., Wuni I.Y.* Systematic review of 4D BIM benefits in construction projects // Results in Engineering. 2025. Vol. 28. P. 107091. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107091
9. *Seng N.H., Teng N.C., Noor N.M., Umar S., Mohd S.* Mapping the Evolution of 4D BIM in Construction Digitalisation : A Scientometric Analysis and Review // Journal Kejuruteraan. 2025. Vol. 37. Issue 6. Pp. 2707–2723. DOI: 10.17576/jkukm-2025-37(6)-11
10. *Олейник П.П., Бродский В.И.* Формирование документации по производству строительно-монтажных работ : монография. М. : Изд-во МИСИ–МГСУ, 2018. 360 с.
11. *Юргайтис А.Ю., Куренков О.Г.* Формирование комплекта исполнительной документации и описание особенностей процедуры сдачи-приемки работ по устройству наружных инженерных сетей // Технология и организация строительного производства. 2017. № 2 (3). С. 11–16. EDN CUOZEZ.
12. *Кабанов В.Н.* Система документального обеспечения строительства // Инженерный вестник Дона. 2019. № 4 (55). С. 51. EDN VTHIGM.
13. *Юргайтис А.Ю., Куренков О.Г., Олейник П.П.* Разработка справочной карточки объекта и унифицированной системы требований к составу комплекта исполнительной документации при приемке объектов Московского метрополитена // Технология и организация строительного производства. 2018. № 2. С. 10–13. EDN ZURUWI.
14. *Куренков О.Г., Олейник П.П.* Исполнительная документация как инструмент совершенствования системы менеджмента качества строительной продукции // Организация строительного произ-

водства : Всеросс. науч. конф. 2019. С. 31–36. EDN OAMHTG.

15. *Куренков О.Г., Олейник П.П.* Оценка степени отражения качества объекта в исполнительной документации // Строительное производство. 2019. № 1. С. 78–81. DOI: 10.54950/26585340_2019_1_78. EDN XVNYSD.

16. *Кузьмина Т.К., Зенов В.С.* Рекомендации для службы застройщика (технического заказчика) по оптимизации ведения исполнительной документации с целью эффективной сдачи-приемки и ввода объекта в эксплуатацию // Перспективы науки. 2019. № 7 (118). С. 139–142. EDN XRNIDK.

17. *Кузьмина Т.К., Сенаторов Н.В.* Ведение исполнительной документации в современных условиях и распространенные проблемы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 4. С. 338–342. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-4-338-342. EDN LYVMYU.

18. *Синенко С.А., Дорошин И.Н., Гнатусь М.А.* Совершенствование подготовки исполнительной документации по возведению зданий и сооружений в современных условиях // Инженерный вестник Дона. 2020. № 2 (62). С. 3. EDN ESSVXJ.

19. *Воронков И.Е., Алабин А.В., Егорова Д.В., Васильева Д.А.* Проблемы и перспективы цифровизации процессов подготовки и согласования исполнительной документации (на примере экосистемы Eхon) // Строительное производство. 2023. № 2. С. 165–170. DOI: 10.54950/2658534020232165. EDN HKBDJV.

20. *Гилязов И.Р., Новоселов А.В.* Анализ возможностей цифровизации строительного комплекса для совершенствования ведения исполнительной документации // Современное строительство и архитектура. 2024. № 2 (45). DOI: 10.18454/mca.2024.45.1. EDN ELNLQX.

21. *Цона Н.В., Карпушкин А.С., Авакян А.К.* О совершенствовании исполнительной документации в условиях цифровизации строительной отрасли // Экономика строительства и природопользования. 2021. № 2 (79). С. 98–109. DOI: 10.37279/2519-4453-2021-2-98-109. EDN ZBMBOD.

Поступила в редакцию 12 января 2026 г.

Принята в доработанном виде 15 января 2026 г.

Одобрена для публикации 13 февраля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Елена Владиславовна Кац — кандидат технических наук, доцент, кафедра информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3218-4786, ORCID: 0000-0003-1907-634X; MakishaEV@mgsu.ru;

Алина Владимировна Суворова — BIM-исполнитель; **Московский архитектурно-художественный проектный институт имени академика Полянского (МАХПИ имени академика Полянского);** 119002, г. Москва, Малый Власьевский переулок, д. 5, стр. 8; pugaeva02@mail.ru.

Вклад авторов:

Кац Е.В. — концепция исследования, формулирование цели и задач, разработка методологии автоматизации формирования исполнительной документации, анализ нормативной и научной базы, интерпретация результатов, написание основного текста статьи, формулирование выводов.

Суворова А.В. — сбор и подготовка исходных данных, участие в разработке алгоритма и модели данных, реализация и апробация программного прототипа, анализ экспериментальных результатов, доработка текста статьи, участие в формулировании итоговых выводов.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Tsopa N.V., Karpushkin A.S. As-built documentation in construction: composition and procedure. *Construction Economic and Environmental Management*. 2020; 4(77):56-65. DOI: 10.37279/2519-4453-2020-4-56-65. EDN BHDEXC. (rus.).
2. Shinkevich V.A., Konoplev S.N. *As-built documentation in construction*. St. Petersburg, TsKS SPb, 2019; 346. (rus.).
3. Karpushkin A.S. The act of inspection of hidden works. Part 1: analysis of the history of the development of the form and procedure of the act. Izvestiya Tula State University. *Technical Sciences*. 2021; 10: 510-520. EDN WZWGSJ. (rus.).
4. Karpushkin A.S. The act of inspection of hidden works. Part 2: improving the form and procedure on the example of foreign approaches. Izvestiya Tula State University. *Technical Sciences*. 2021; 10:537-545. EDN IFMXQB. (rus.).
5. Saad I.M.H., Batie D. The Science & Technology Building 4D Construction Model. *ASEE Southeast Section Conference*. 2020.
6. Nechyporchuk Y., Baskova R. The level of detail for 4D BIM modeling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1209(1):012002. DOI: 10.1088/1757-899X/1209/1/012002
7. Son H., Kim C., Cho Y.K. Automated Schedule Updates Using As-Built Data and a 4D Building Information Model. *Journal of Management in Engineering*. 2017; 33(4). DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000528
8. Rehman I.U., Mazher K.M., Wuni I.Y. Systematic review of 4D BIM benefits in construction projects. *Results in Engineering*. 2025; 28:107091. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107091
9. Seng N.H., Teng N.C., Noor N.M., Umar S., Mohd S. Mapping the Evolution of 4D BIM in Construction Digitalisation : A Scientometric Analysis and Review. *Journal Kejuruteraan*. 2025; 37(6):2707-2723. DOI: 10.17576/jkukm-2025-37(6)-11
10. Oleynik P.P., Brodskiy V.I. *Formation of documentation for construction and installation works*. Moscow, MISI-MGSU Publ., 2018; 360. (rus.).
11. Yurgaytis A.Y., Kurenkov O.G. Set formation of executive documentation and a description of the procedure specifics for the acceptance of the installation of external engineering networks. *Technology and Organization of Construction Production*. 2017; 2(3):11-16. EDN CUOZEZ. (rus.).
12. Kabanov V.N. Simulation of the design activity diversification of innovative enterprise. *Engineering journal of Don*. 2019; 4(55):51. EDN VTHIGM. (rus.).
13. Yurgaytis A., Kurenkov O., Oleinik P.P. Development of a reference card for the facility and a unified requirements system for the executive documentation during acceptance of the Moscow metro facilities. *Technology and Organization of Construction Production*. 2018; 2:10-13. EDN ZURUWI. (rus.).
14. Kurenkov O.G., Oleinik P. As-built documentation as a tool to improve the quality management system of construction production. *Organization of Construction Production : Proceedings of the All-Russian Scientific Conference*. 2019; 31-36. EDN OAMHTG. (rus.).
15. Kurenkov O.G., Oleinik P. Assessment of the degree of reflection of the quality of the object in the as-built documentation. *Construction Production*. 2019; 1:78-81. DOI: 10.54950/26585340_2019_1_78. EDN XVNYSD. (rus.).
16. Kuzmina T.K., Zenov V.S. Recommendations for the developer (technical customer) on the optimization of post-completion documentation for commissioning of the facility in operation. *Science Prospects*. 2019; 7(118):139-142. EDN XRNIDK. (rus.).
17. Kuzmina T.K., Senatorov M.V. Maintenance of executive documentation in modern conditions and common problems. Izvestiya Tula State University. *Technical Sciences*. 2021; 4:338-342. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-4-338-342. EDN LYVMYU. (rus.).
18. Sinenko S.A., Doroshin I.N., Gnatus M.A. Improvement of the executive documentation preparation for construction of buildings and structures in modern conditions. *Engineering journal of Don*. 2020; 2(62):3. EDN ESSVXJ. (rus.).
19. Voronkov I.E., Alabin A.V., Egorova D.V., Vasilyeva D.A. Problems and prospects of digitalization of processes of preparation and approval of executive documentation (on the example of the exon ecosystem). *Construction Production*. 2023; 2:165-170. DOI: 10.54950/2658534020232165. EDN HKBDJV. (rus.).
20. Gilyazov I.R., Novoselov A.V. An analysis of opportunities of digitalization of the construction sector for improving the management of executive documentation. *Modern Construction and Architecture*. 2024; 2(45). DOI: 10.18454/mca.2024.45.1. EDN ELNLQX. (rus.).
21. Tsopa N.V., Karpushkin A.S., Avakian A.K. About the necessity to improve as-built documentation in conditions of construction industry digitalization. *Economics of Construction and Environmental Management*. 2021; 2(79):98-109. DOI: 10.37279/2519-4453-2021-2-98-109. EDN ZBMBOD. (rus.).

Received January 12, 2026.

Adopted in revised form on January 15, 2026.

Approved for publication on February 13, 2026.

B I O N O T E S : **Elena V. Kats** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3218-4786, ORCID: 0000-0003-1907-634X; MakishaEV@mgsu.ru;

Alina V. Suvorova — BIM specialist; **Moscow Architectural and Art Design Institute named after Academician Polyansky (MAKhPI named after Academician Polyansky)**; build. 8, 5 Maly Vlashevsky Lane, Moscow, 119002, Russian Federation; pugaeva02@mail.ru.

Contribution of the authors:

Elena V. Kats — research concept, formulation of aims and objectives, development of the methodology for automating as-built documentation generation, analysis of regulatory and scientific sources, interpretation of results, drafting of the main text of the article, formulation of conclusions.

Alina V. Suvorova — collection and preparation of source data, participation in the development of the algorithm and data model, implementation and validation of the software prototype, analysis of experimental results, revision of the manuscript, participation in formulating final conclusions.

The authors declare that they have no conflict of interest.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника). Все иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Файлы растровых изображений должны предоставляться с разрешением не менее 300 dpi, размером не менее 1200 × 1200 px, в файлах формата .jpg, .tiff. Графики, чертежи и иллюстрации, созданные с помощью программ векторной графики (CorelDraw, Excel, Adobe Illustrator и прочих), следует экспортировать в PDF-файл из этой программы (предпочтительно), либо предоставлять исходник в формате той программы, в которой они созданы. Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подписи рисунков и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В Сведениях об авторах (Bionotes) представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотечных депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в

тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия^{2...}

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. **См. рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Abstract (200–250 слов)**Introduction:** text, text, text.**Materials and methods:** text, text, text.**Results:** text, text, text.**Conclusions:** text, text, text.**Key words:** text, text, text.**Acknowledgements:** text, text, text.**Corresponding author:** Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке источников сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в

статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями **ГОСТа Р 7.0.5–2008**.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Вклад авторов: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

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.

