

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 20. Выпуск 9
2025**

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

Сквозной номер 202

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 20. Issue 9
2025**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 24-76
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	26.09.2025.
Подписан в свет	29.09.2025.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 19,07. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 311

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

строительный факультет, Республика Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: Алла Русланбековна Табекова

Редактор: Татьяна Владимировна Бердникова

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Дизайн и верстка: Алина Юрьевна Байкова

Перевод на английский язык: Ольга Валерьевна Юденкова

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	26.09.2025

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Editorial Board

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

Piotr 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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

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

Ф.С. Школяр, М.О. Стародубцев, М.А. Сафошкин, А.А. Астахов

Численное исследование напряженно-деформированного состояния жесткого конькового узла
деревянных конструкций с вклеенными шайбами 1313

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Х.А. Кайс, Н.Н. Морозова

Электрохимические и физико-механические свойства композитов на основе
гипсоцементно-пуццоланового вяжущего 1330

В.С. Лесовик, Д.А. Толыпин, Н.М. Толыпина

Сравнительный анализ способов оценки реологической эффективности комплексных модификаторов
в цементных системах 1343

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.Г. Первов, Д.В. Спицов, Т.З. Аунг, А.С. Кулагина

Совершенствование систем обратного осмоса, используемых для питьевого и технического
водоснабжения 1354

Н.Ю. Саввин

Математическая модель процесса потокораспределения в инженерных системах здания 1373

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Э.Ю. Чурилова

Средние цены на рынке жилья Москвы: анализ динамики и прогнозы 1386

А.А. Руденко, С.В. Сазонов

Оценка факторов и модель производства свайных работ при строительстве и восстановлении
зданий 1401

Т.С. Мецзякова, В.В. Кутузов

Анализ технологий бережливого строительства в условиях цифровой трансформации отрасли 1419

Е.Ю. Васильева, Я. Ариани

Эффективность применения BIM-технологий при демонтаже зданий 1431

А.Е. Лебедева, И.В. Каракозова, М. Альшрайдех

Инструменты контроля стоимости при реализации проектов подрядными организациями 1443

Требования к оформлению научной статьи 1455

1310

CONTENTS

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

Filipp S. Shkoliar, Maxim O. Starodubcev, Mikhail A. Safoshkin, Andrey A. Astahov

Numerical study of the stress-strain state of a rigid ridge assembly of wooden structures with
glued washers 1313

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Hamza A. Qais, Nina N. Morozova

Electrochemical and physical-mechanical properties of composites based
on gypsum-cement-pozzolan binder 1330

Valeriy S. Lesovik, Daniil A. Tolypin, Natalia M. Tolypina

Comparative analysis of methods for assessing the rheological efficiency of complex modifiers in cement
systems 1343

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Alexei G. Pervov, Dmitriy V. Spitsov, Htet Zow Aung, Anna S. Kulagina

Improvement of reverse osmosis systems used for drinking and technical water supply 1354

Nikita Yu. Savvin

Mathematical model of the flow distribution process in building engineering systems 1373

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION.
ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Elvira Yu. Churilova

Average prices in the Moscow housing market: analysis of dynamics and forecasts 1386

Aleksandr A. Rudenko, Sergey V. Sazonov

Factor assessment and piling production model for construction and restoration
of buildings 1401

Tatiana S. Meshcheryakova, Victor V. Kutuzov

Analysis of lean construction technologies in the context of digital transformation of the industry 1419

Elena Yu. Vasilyeva, Yanu Aryani

Efficiency of BIM-technologies application in dismantling of buildings 1431

Aleksandra E. Lebedeva, Irina V. Karakozova, Miral Al-Shraideh

Cost control tools in project implementation by contractors 1443

Requirements for research paper design 1455

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).

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 694.143

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1313-1329

Численное исследование напряженно-деформированного состояния жесткого конькового узла деревянных конструкций с клееными шайбами

Филипп Сергеевич Школяр, Максим Олегович Стародубцев,
Михаил Александрович Сафошкин, Андрей Александрович Астахов
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);
г. Санкт-Петербург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Чтобы придать большую жесткость деревянному пространственному каркасу здания, воспринимающему горизонтальные нагрузки от ветра, необходимо ввести в расчетную схему жесткие узлы. Недостаточность нормативной базы по расчету узлов с клееными соединениями приводит к разобщенности методик расчета, используемых инженерами-проектировщиками. Предложена методика конструирования и расчета конькового узла деревянных конструкций с клееными шайбами.

Материалы и методы. Выполнены инженерный расчет конькового узла и его элементов, моделирование и расчет рассматриваемого соединения, а также анализ возможности его применения на примере существующего здания, рассчитанного в ПК SCAD.

Результаты. Разработано конструктивное решение жесткого узла нового типа на основании применения клеиваемых в древесину стальных шайб. Проведены численно-теоретический анализ каждого элемента соединения на усилия, передаваемые соседними конструкциями; оценка численного порядка воспринимаемого предлагаемой конструкцией изгибающего момента. Несущая способность предлагаемого решения исключает податливость и повышает прочность всего соединения.

Выводы. Предлагаемый узел имеет меньший вес по сравнению с аналогичными на клеенных стержнях. Новая конструкция узла поможет проектировщикам расширить вариативность методов конструирования узлов, предложенных в нормативной базе, а также использовать новую конструкцию соединений взамен типовых решений. Рассматриваемый метод расчета узлового соединения способен улучшить надежность, повысить экономическую эффективность всей конструкции в целом. Возможность применения предлагаемого узла подтверждена методами численного моделирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стропильная конструкция, узловые соединения, жесткий узел, клеенные шайбы, несущая способность, деревянные конструкции, жесткий стык

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Школяр Ф.С., Стародубцев М.О., Сафошкин М.А., Астахов А.А. Численное исследование напряженно-деформированного состояния жесткого конькового узла деревянных конструкций с клееными шайбами // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 9. С. 1313–1329. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1313-1329

Автор, ответственный за переписку: Филипп Сергеевич Школяр, shkolyar.fs@gmail.com.

Numerical study of the stress-strain state of a rigid ridge assembly of wooden structures with glued washers

Filipp S. Shkoliar, Maxim O. Starodubcev, Mikhail A. Safoshkin, Andrey A. Astahov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In order to give geometric immutability to load-bearing structures that accept horizontal loads from the wind, it is necessary to introduce rigid nodes into the design scheme. The insufficiency of the regulatory framework for calculating nodes with glued joints leads to a separation of calculations from company to company. This paper proposes a method for designing and calculating a ridge assembly of wooden structures with glued washers.

Materials and methods. Engineering calculation of the ridge node and its elements, modelling and calculation of the considered connection, as well as analysis of the possibility of its application on the example of an existing building, calculated in the SCAD software.

Results. A constructive solution for a new type of rigid assembly was developed based on the use of steel washers glued into wood. A numerical and theoretical analysis of each element of the joint for the forces transmitted by neighboring structures is carried out. Estimation of the numerical order of the bending moment perceived by the proposed design. The bearing capacity of the proposed solution eliminates ductility and increases the strength of the entire joint.

Conclusions. The proposed assembly is lighter than its counterpart on glued rods, and the lack of a regulatory framework for such structures forces designers to make standard decisions. The proposed method for calculating the nodal connection can improve reliability, as well as increase the economic efficiency of the entire structure. The possibility of using the proposed node has been confirmed by numerical modelling methods.

KEYWORDS: rafter structure, nodal joints, rigid assembly, glued washers, load-bearing capacity, wooden structures, rigid joint

FOR CITATION: Shkoliar F.S., Starodubcev M.O., Safoshkin M.A., Astahov A.A. Numerical study of the stress-strain state of a rigid ridge assembly of wooden structures with glued washers. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(9):1313-1329. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1313-1329 (rus.).

Corresponding author: Filipp S. Shkoliar, shkoliar.fs@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое внедрение древесины в строительстве обусловлено ее экологичностью, экономичностью и эстетической привлекательностью [1]. Древесина — это устойчивый, визуально привлекательный материал, который уже много лет применяется в строительных конструкциях будучи самым распространенным возобновляемым строительным ресурсом, предоставленным природой.

Использование деревянных конструкций по сравнению с железобетонными дает возможность сократить расход стали, а также способствует снижению веса здания или сооружения, что позволяет уменьшить расходы на транспортировку необходимых материалов на строительную площадку, что актуально в таких регионах, как Сибирь и Дальний Восток^{1,2}.

Узлы и соединения деревянных конструкций оказывают воздействие на работу всей конструкции, ее характеристики, надежность и экономичность. М.С. Золотов, Г.Н. Зубарев, Ю.М. Иванов, Л.М. Ковальчук, А.В. Калугин в своих исследованиях [2–7] описывают опыт применения стальных элементов в узлах и соединениях деревянных конструкций и выделяют деформационные характеристики как наиболее важный показатель, влияющий на жесткость и эксплуатационную надежность зданий и сооружений.

Ф.С. Школяр, А.С. Никитин и А.И. Зацепина в статье [8] приводят результаты испытаний образцов клееной древесины с вклеенным в каждый образец арматурным стержнем периодического профиля. Для испытуемых образцов получены значения полных деформаций для каждой ступени нагружения и вычислены значения сопротивления древесины и податливости для каждого образца.

¹ Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте : мат. III Междунар. науч.-техн. конф. Самара, 2005.

² Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс : мат. 12 Междунар. симпозиума. Одесса, 2007.

В России деревянные конструкции распространены в области частного строительства, однако большая часть таких конструкций не рассчитывается, а возводится по опыту уже построенных зданий, нормативная база также требует обновления для повышения эффективности подобных конструкций. Особенное внимание следует уделять узловым соединениям как наиболее ответственным элементам конструкции.

Стоит отметить, что разрушение деревянных конструкций происходило в результате недостаточной сдвиговой прочности строительной конструкции, выполненной из клееной древесины. Г.Н. Зубарев и С.Б. Турковский [9–11] занимались изучением новых соединений деревянных конструкций с применением вклеенных стержней, установленных под углом 30–45° к направлению волокон, что позволило повысить сдвиговую прочность соединений деревянных конструкций.

Вопрос устройства жестких узлов соединения деревянных конструкций рассматривают как российские, так и зарубежные ученые.

T. Shchelokova в своей работе [12] отмечает, что в армированных деревянных балках деформации на 15–20 % меньше, чем в неармированных деревянных ригелях. Также автор указывает на значительное влияние пороков древесины на напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции.

R. Jockwer, D. Caprio и A. Jorissen [13] исследуют взаимосвязь расстояния между крепежными элементами и значениями деформаций деревянных конструкций.

В статье [14] представлены наиболее важные геометрические параметры узловых соединений деревянных балок. К таким параметрам авторы отнесли высоту и ширину балки, относительную высоту соединения, ширину и высоту соединения.

Рассматривается армирование клееных балок в растянутой зоне гладкими и ребристыми стержнями [15]. Такие конструкции имеют большую прочность (на 20 %) по сравнению с неармированными деревянными конструкциями.

В работе [16] исследуется взаимосвязь структуры годовых колец древесины как на локальное по-

ведение материала, так и на глобальную прочность при сжатии перпендикулярно волокнам.

М. Steilner и Н. J. Blaß [17] отмечают, что момент текучести крепежа является одним из важнейших параметров в соединениях деревянных конструкций, выполненных с помощью металлических элементов соединений.

С. Franke, N. Magnière [18] рассматривают преимущества модели, описанной в Eurocode 5 по сравнению с SIA 265, однако подчеркивают, что данная модель оптимизирована только для хвойных пород древесины.

М. Schweigler, Т. K. Bader, G. Hochreiner, R. Lemaitre [19] анализируют соединения деревянных конструкций на стальных стержнях. Авторы описывают многоэтапный подход к параметризации нелинейного и неоднородного поведения подобных узлов.

Н. J. Blaß, F. Colling [20] приводят испытания, согласно результатам которых можно сделать вывод о завышении несущей способности узловых соединений деревянных конструкций по методике DIN 1052:1988. Расхождение составляет порядка 10–25 %.

С. Franke и N. Magnière [21] указывают на значительные расхождения результатов оценки прочности древесины по американским, европейским и международным стандартам.

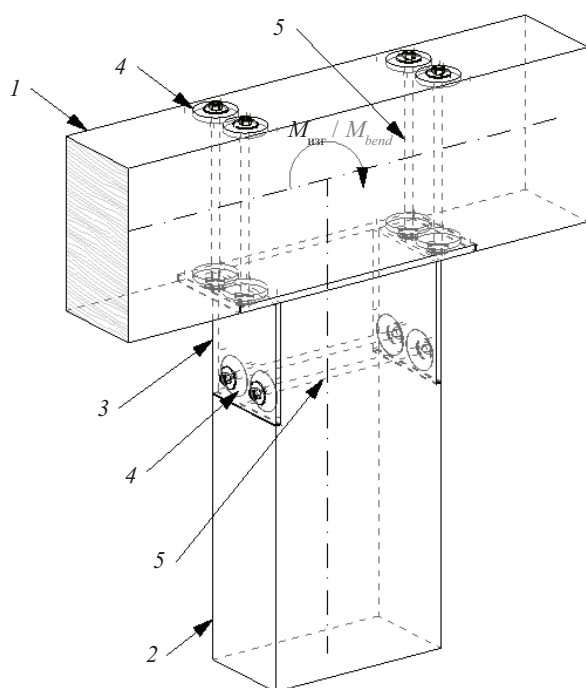


Рис. 1. Общий вид жесткого узла с применением клеенных шайб: 1 — несущая балка конькового прогона; 2 — стойка; 3 — металлическая деталь сопряжения; 4 — клеиваемые шайбы; 5 — конструктивные стяжные шпильки

Fig. 1. General view of a rigid assembly using glued washers: 1 — bearing girder of a ridge girder; 2 — rack; 3 — metal coupling part; 4 — washers to be glued; 5 — structural tie pins

Таким образом, проанализировав отечественную и зарубежную литературу, посвященную использованию в узловых соединениях деревянных конструкций металлических изделий, можно сделать вывод о том, что данная тема является актуальной. Недостаточность нормативной базы по расчету подобных узлов приводит к разобщенности расчетов от компании к компании.

В настоящей статье предложена методика конструирования и расчета конькового узла деревянных конструкций с клееными шайбами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Применяются теоретические методы исследования, а также методы численного моделирования. Цель исследования — предложить конструкцию узлового соединения на клеенных шайбах, а также метод расчета предлагаемого узла; провести анализ возможности применения предлагаемого решения на практике.

Для достижения поставленной цели решался ряд задач:

- 1) установить общую конструкцию и составляющие элементы узлового соединения;
- 2) выполнить расчеты несущей способности составляющих элементов узла;
- 3) рассчитать общую несущую способность предлагаемого узла;
- 4) произвести анализ возможности применения узла на клеенных шайбах на практике.

1. Общий вид и исходные условия для разработки конструкции жесткого узла

Общий вид рассматриваемой конструкции жесткого соединения несущих элементов стропильной системы представлен на рис. 1. Подробная расчетная схема показана на рис. 2, а ее расчет представлен далее.

Так как рассматриваемый узел должен считаться жестким, помимо отсутствия неупругих деформаций при малых усилиях, все составляющие его элементы необходимо рассчитать на усилия от изгибающих моментов в стыкуемых элементах. Особенно важно восприятие растягивающей составляющей пары сил, полученной от разложения изгибающего момента на компоненты.

В стойке оптимальное расположение стальных клеиваемых шайб находится в области, соответствующей направлению передачи растягивающих нагрузок строго вдоль волокон древесины на расстоянии, максимально удаленном от сжимающей составляющей приложенного момента. Это связано с тем, что древесина обладает наибольшей прочностью при воздействии местных нагрузок на сжатие и раскалывание вдоль волокон.

Проведем численно-теоретическое обоснование допустимых нагрузок, рассматривая каждый элемент по отдельности. Важной особенностью



данного расчета является его обратный порядок, который предполагает оценку усилий, воспринимаемых соединением, и выбор равнопрочных составляющих.

Конструкция узлового соединения предусматривает возможность сборки готовых стыкуемых элементов непосредственно на строительной площадке с помощью индивидуальной металлической детали. В балке и стойке должны быть установлены стальные шайбы, которые предварительно клеиваются в заводских условиях. Наличие этих шайб необходимо для устранения податливости соединения в целом. В стойке шайбы выполняют функцию, предотвращающую раскалывание и смятие древесины, действуя вдоль волокон, а в балке — для равномерного распределения усилий, возникающих при местном смятии древесины под шайбами поперек волокон.

В этом случае стяжные шпильки подобно традиционным нагелям не участвуют в процессе работы и не контактируют с древесиной благодаря увеличенным сквозным отверстиям. Такие условия позволяют шпилькам действовать непосредственно на чистом срезе между металлом индивидуальной детали и вклеенными стальными шайбами, что существенно повышает прочность конструкции.

Чтобы уменьшить общую податливость соединения между балкой и колонной введем клеенные шайбы, располагая их попарно в верхней и ниж-

ней плоскостях балки. Для дальнейшего расчета на смятие древесины под шайбами, возникающего при передаче усилий через вертикальные стяжные шпильки, определим площадь контакта шайб с древесиной, при этом не учитывая работу самого клевого соединения по боковым кромкам шайб:

$$S_{\text{III}} = 3,14 \cdot 4^2 - 3,14 \cdot 0,9^2 = 50,24 - 2,54 = 47,70 \text{ см}^2.$$

Расчетную несущую способность древесины, работающую на смятие под шайбами, найдем по формуле:

Местное расчетное сопротивление древесины смятию при угле смятия 90° поперек волокон в соединениях под шайбами определим по формуле:

$R_{\text{сн90}} = 6,0 \cdot 0,8 \cdot 1,15 = 5,52 \text{ МПа} = 56,27 \text{ кгс/см}^2$,
где $R_{\text{сн90}}^A = 6,0 \text{ МПа}$ — расчетное местное сопротивление под шайбами при углах смятия от 90 до 60° для древесины 2-го сорта, определяемое по табл. 3³;
 $m_{\text{дл}} = 0,8$ — коэффициент длительной прочности, соответствующий режиму длительности загрузки Д (совместное действие постоянное, снеговой и ветровой нагрузок), определяется по табл. 4³;

³ СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25–80. М. : Стандартформ, 2017. 90 с.

П $m_i = 1,15$ — произведение коэффициентов условий работы, устанавливается по пункту 6.9³.

Тогда несущая способность опорной шайбы в балке по смятию древесины поперек волокон равна:

$$T_{шб,верх} = 2 \cdot 56,27 \cdot 47,7 = 5368,2 \text{ кгс.} \quad (4)$$

3. Расчет стяжных шпилек и опорной стальной пластины балки

Вертикальные стяжные шпильки в соединениях работают на чистое растяжение. Хотя можно использовать шпильки с полной резьбой, для высоконагруженных конструкций рекомендуется применять более надежные индивидуальные шпильки, изготовленные из гладкой арматуры и обработанные на станке.

С точки зрения экономической выгоды примем первый вариант. Несущую способность пары шпилек на растяжение с учетом коэффициентов условий работы рассчитаем по формуле:

$$N_p = 2 \cdot F_a \cdot R_{bt} \cdot m_o \cdot m_{анк} \cdot m_n, \quad (5)$$

где F_a — минимальная площадь гладкой части шпильки без учета резьбы; $m_o = 0,8$ — коэффициент, учитывающий концентрацию напряжений в зоне резьбы; $m_{анк} = 1,0$ — коэффициент, учитывающий неравномерность работы двух растянутых элементов; $m_n = 1,2$ — коэффициент, учитывающий наличие кратковременной ветровой нагрузки.

С целью унификации компонентов узлового соединения примем усиленную резьбовую шпильку с наиболее распространенным классом прочности 5,8 (в дальнейшем возможно увеличение, либо замена самого класса прочности) диаметром $d_{шп} = 16$ мм по DIN 975. Для принятого класса прочности расчетное сопротивление шпильки растяжению $R_{bt} = 2000$ кгс/см². Тогда несущая способность растянутых вертикальных стяжных шпилек равна:

$$T_{шп,верх} = N_p = 2 \cdot 1,57 \cdot 2000 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \times 1,2 = 6028,8 \text{ кгс.} \quad (6)$$

Вертикальная стяжная шпилька соединяется с опорной пластиной в своей нижней части. Пластина является конечным элементом, передающим и растягивающим усилия от балки к стойке и сжимающим усилия, возникающие при разложении изгибающего момента, но уже с противоположной стороны.

Также в соединении присутствует дополнительная, выполняющая скорее конструктивную функцию, вклеенная в нижнюю плоскость балки шайба. Эта шайба может включиться в работу по смятию древесины поперек волокон от сжатия с другой стороны, а также придает соединению монолитность.

Сжимающие усилия распределяются по площадке контакта двух деревянных элементов. Наибольшую опасность представляет выгиб опорной пластины вверх. Поэтому зададимся целью проверить консольный вылет опорной части пластины из прокатной стали С245 по сортаменту.

С учетом конструктивных требований по размещению и величине отверстий в металлических

элементах определим величину консольного вылета пластины. Диаметр отверстия $d_{отв}$ для шпильки М16 примем на 1 мм шире самого элемента. Минимальное расстояние от центра болта до края элемента в соединяемых элементах из стали с пределом текучести до 380 МПа в направлении поперек передаче усилия при обрезных кромках принимается не менее $1,5d_{отв}$. Общую длину консоли с целью возможности конструктивной выборки гнезд под шайбы, а также для сохранения возможности удобного размещения фиксирующих гаек при монтаже определим как:

$$l_{пл} = h_{ст} + 2 \cdot (1,5 \cdot d_{отв}); \quad (7)$$

$$l_{пл} = 360 + 2 \cdot (2 \cdot 1,5 \cdot 17) = 462 \text{ мм.}$$

С учетом округления примем пластину габаритами 190×10 мм. Толщину опорной пластины зададим равной $t_{пл} = 16$ мм с возможностью последующей корректировки в зависимости от несущей способности других элементов в составе узла.

Тогда полный консольный вылет пластины составит:

$$l_{кон} = (l_{пл} - h_{ст})/2; \quad (8)$$

$$l_{кон} = \frac{510 - 360}{2} = 75 \text{ мм} = 7,5 \text{ см.}$$

Расчетное сопротивление изгибу для стали марки С245 $R_{ст} = 245$ МПа = 2450 кгс/см².

Так как расстояние между шпильками достаточно мало, а также с учетом принятого минимально допустимого вылета пластины по длине за сечение стойки примем распределение растягивающего усилия $q_{рас}$ через гайки равномерным по всей площади защемленного элемента.

Определив максимально допустимое нормальное напряжение в элементе $\sigma_{ст}$, найдем предельно допустимую нагрузку на консольную часть пластины для восприятия усилий растяжения от действия изгибающего момента $\sigma_{ст}$ по формуле:

$$\sigma_{ст} \leq R_{ст} = 2450 \text{ кгс/см}^2. \quad (9)$$

Для расчета приняты единицы измерения напряжения на см². Выделим консольный элемент пластины шириной 1 см, тогда:

$$\sigma_{ст} = \frac{M_{max}}{W} = R_{ст}. \quad (10)$$

Найдем максимально допустимый изгибающий момент в пластине M_{max} :

$$M_{max} = \frac{q_{рас} \cdot (l_{кон})^2}{2}. \quad (11)$$

Максимально допустимое расчетное значение распределенной нагрузки вычислим следующим образом:

$$q_{рас} = \frac{N_{max}}{S_{оп}} = \frac{N_{max}}{l_{кон} \cdot b}. \quad (12)$$

Подставляя в формулу (10) для определения нормального напряжения полученные величины, имеем:

$$\sigma_{ст} \leq R_{ст} = \frac{M_{max}}{W} = \frac{q_{рас} \cdot (l_{кон})^2}{2} \cdot \frac{6}{bh^2} = \frac{N_{max} \cdot (l_{кон})^2}{l_{кон} \cdot b \cdot 2} \cdot \frac{6}{bh^2}. \quad (13)$$

Преобразуя уравнение, найдем максимальное усилие растяжения N_{max} :

$$\frac{1}{N_{max}} = \frac{(l_{кон})^2}{l_{кон} \cdot b \cdot 2} \cdot \frac{6}{bh^2} \cdot \frac{1}{R_{ст}}; \quad (14)$$

$$N_{max} = \frac{l_{кон} \cdot b \cdot 2}{(l_{кон})^2} \cdot \frac{bh^2}{6} \cdot R_{ст}; \quad (15)$$

$$T_{пл} = N_{max} = \frac{6 \cdot 19 \cdot 2}{(7,5)^2} \cdot \frac{1 \cdot (1,6)^2}{6} \cdot 2450 = 5817,5 \text{ кгс}. \quad (16)$$

Из расчета видно, что третий принятый конструктивный элемент в узле не уступает по своей несущей способности предыдущим. Принятое сечение пластины $t_{пл} = 16$ мм.

4. Расчет на прочность сварных швов крепления вертикальных пластин к опорной

Производство металлической детали предполагается в полностью заводских условиях. Заводские сварные соединения должны выполняться полуавтоматической сваркой⁴ в углекислом газе сварочной проволокой Св-08Г2С диаметром не менее 1,4 мм.

Несмотря на то, что проверка сварного шва вызывает наименьшие опасения по величине расчетного сопротивления, определим несущую способность шва по формуле:

$$\frac{c}{b} \leq 0,25 \rightarrow (N_{max} + 0,5M/d) \times \frac{(1,06 + 0,014D/t) \sin \alpha}{\beta_f \cdot k_f \cdot \gamma_c \cdot R_{wf} \cdot (2d/\sin \alpha)} \leq 1. \quad (17)$$

В местах контакта с опорной пластиной вертикальные пластины испытывают вырывание под прямым углом, а также не испытывают действие изгибающего момента. Следовательно, формула (17) принимает следующий вид:

$$N_{max} = \frac{\beta_f \cdot k_f \cdot \gamma_c \cdot R_{wf} \cdot (2d)}{(1,06 + 0,014D/t)}, \quad (18)$$

где β_f — коэффициент, зависящий от положения сварного шва, толщины свариваемых элементов и вида сварки, принимается по табл. 39⁵;

$$\beta_f = 0,9;$$

k_f — катет сварного шва, $k_f = 6$ мм; R_{wf} — расчетное сопротивление металла шва для электрода Э50А, принимается по приложению Г (табл. Г.2)⁵:

$$R_{wf} = \frac{R_{wf}}{\gamma_n}; \quad (19)$$

$R_{wf} = 215/1 = 215$ МПа = 2191,7 кгс/см²; d — длина участка примыкания вертикальной пластины; t — толщина свариваемых деталей, $t = 10$ мм.

Найдем максимальное усилие в сварном шве на вырывание вертикальной пластины:

$$N_{max} = \frac{\beta_f \cdot k_f \cdot \gamma_c \cdot R_{wf} \cdot (2d)}{(1,06 + 0,014D/t)}; \quad (20)$$

$$T_{св} = N_{max} = \frac{0,9 \cdot 0,6 \cdot 1 \cdot 2191,7 \cdot (2 \cdot 19)}{(1,06 + 0,014D/1)} = 38\,104,5 \text{ кгс}. \quad (21)$$

5. Расчет болтового соединения при передаче усилия на вклеенные шайбы в стойке

В месте передачи усилий от действия изгибающего момента за счет прямого контакта только между металлической деталью балки и вклеенными в стойку шайбами устанавливаются горизонтальные стяжные шпильки, которые рассчитываются как болтовое соединение, при этом требуется выполнить следующие прочностные проверки:

1. Проверка болтового соединения на срез.
2. Расчет несущей способности металла на смятие.

Шпильки не будут испытывать напряжение изгиба от смятия древесины, работая в условиях односрезного соединения двух металлических пластин до тех пор, пока не исчерпается запас прочности самих вклеенных шайб по смятию древесины.

Схема работы болтового соединения показана на рис. 3.

Для унификации вклеенных шайб примем диаметр стяжного болта таким же, как и для вертикальной балочной шпильки. В ответственных конструкциях следует по возможности избегать применения покупных шпилек, используя более надежные токарные шпильки из гладкой арматуры класса А240 с подготовленной по обоим концам резьбой для фиксации гайкой.

⁴ ГОСТ 14771–76. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. М. : Стандартформ, 2007. 38 с.

⁵ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23–81. М. : Стандартформ, 2017. 151 с.

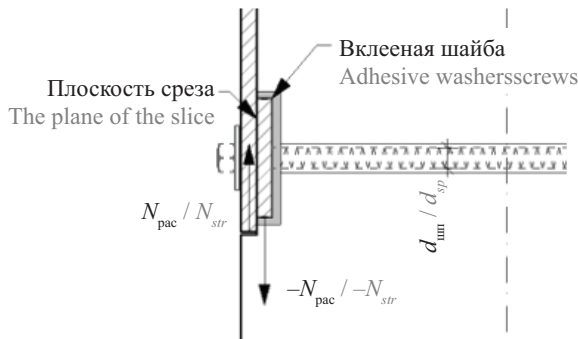


Рис. 3. Схема работы болтового соединения на чистый срез

Fig. 3. The scheme of operation of the bolted connection for a clean cut

Рассчитаем несущую способность горизонтальных шпилек на срез:

$$N_{bs} = R_{bs} A_b n_s \gamma_b \gamma_c, \quad (22)$$

где N_{bs} — несущая способность одного болта на срез; R_{bs} — расчетное сопротивление болта на срез; A_b — площадь сечения шпильки брутто (принимается согласно DIN 975); n_s — число срезов для одного болта. В данном случае число срезов $n_s = 1$; γ_b — коэффициент условия работы болтового соединения, принимаемый согласно табл. 41³; γ_c — коэффициент условия работы, принимаемый согласно табл. 1³.

Определим несущую способность горизонтальных шпилек на смятие:

$$N_{bp} = R_{bp} d_b \Sigma t \gamma_b \gamma_c, \quad (23)$$

где N_{bp} — несущая способность одного болта на смятие; R_{bp} — расчетное сопротивление одного болта на смятие; d_b — наружный диаметр стрежня болта по резьбе; Σt — наименьшая суммарная толщина соединяемых элементов, сминаемых в одном направлении. Так как в рассматриваемом соединении участвует вертикальная пластина с $t_{пл} = 10$ мм, а принятая толщина клеиваемых шайб также равна 10 мм, значение $\Sigma t = 1$ см.

Класс прочности горизонтальных шпилек принимаем 5,8 диаметром 16 мм, аналогично ранее принятым вертикальным. Найдем предел прочности на срез по формуле (22). Размер отверстия принимаем на 1 мм больше наружного диаметра шпильки для класса точности изготовления В. Тогда:

$$N_{bs} = 2140 \cdot 1,57 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 3359,8 \text{ кгс.}$$

Найдем предел прочности болтового соединения по смятию по формуле (23):

$$N_{bp} = 4750 \cdot 1,6 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 7600,0 \text{ кгс.}$$

Максимальное расчетное усилие определяется по наименьшему значению после проведения проверочного расчета. В данном случае имеем:

$$T_{бол} = N_2 = \min(N_{bs}; N_{bp}) \cdot n = 3359,8 \cdot 2 = 6719,6 \text{ кгс.} \quad (24)$$

На этапе подбора стяжных горизонтальных шпилек принцип равнопрочности узла сохраняется с появлением небольшого запаса.

6. Расчет несущей способности клеенных шайб

Действующие нормативные документы не предъявляют требований по оценке несущей способности клеенных шайб. Клеенные на эпоксидный клей в гнездо шайбы образуют монолитное соединение с деревом, работая в первую очередь на смятие древесины вдоль волокон. Также в работу всего соединения включается клеевой шов, надежно фиксирующий шайбу по плоскости контакта с деревом.

Поскольку в жестких узлах отсутствует податливость от начальных деформаций древесины, стоит рассматривать общую несущую способность всего соединения путем сложения сопротивлений как клеевой композиции, так и работы дерева под нагрузкой от шайб.

Хотя действующие нормы по проектированию жестких узлов на основе клеенных стержней ограничивают применение арматуры гладкого профиля, официальных рекомендаций по технологии использования клеенных шайб пока не разработано.

Схема работы клеенных шайб в соединении показана на рис. 4.

Самый опасный вид хрупкого разрушения древесины, который определяет весь дальнейший расчет, это ее скалывание вдоль волокон, поэтому для начала определим несущую способность соединения на скалывание. Аналогично предыдущим расчетам габариты клеенных шайб установим конструктивно из условий возможности размещения шайб максимального размера и, следовательно, включения в работу полного сечения древесины по смятию и скалыванию вдоль волокон.

Предельно допустимую нагрузку для клеенной шайбы, работающей на скалывание древесины вдоль волокон, найдем по формуле:

$$T_{ск} = R_{ск}^{cp} \cdot F_{ск}, \quad (25)$$

где $R_{ск}^{cp}$ — среднее по площадке скалывания расчетное сопротивление древесины скалыванию вдоль волокон, согласно пункту 8.3¹, определяется по формуле (26); $F_{ск}$ — расчетная площадь площадки скалывания. В нашем случае увеличением отверстия для свободного вложения шайбы в гнездо пренебрежем, определим ширину площадки как диаметр шайбы.

Найдем расчетное среднее по площадке скалывания сопротивление древесины скалыванию вдоль волокон $R_{ск}^{cp}$ по формуле:

$$R_{ск}^{cp} = \frac{R_{ск}}{1 + \beta \cdot l_{ск} / e}, \quad (26)$$

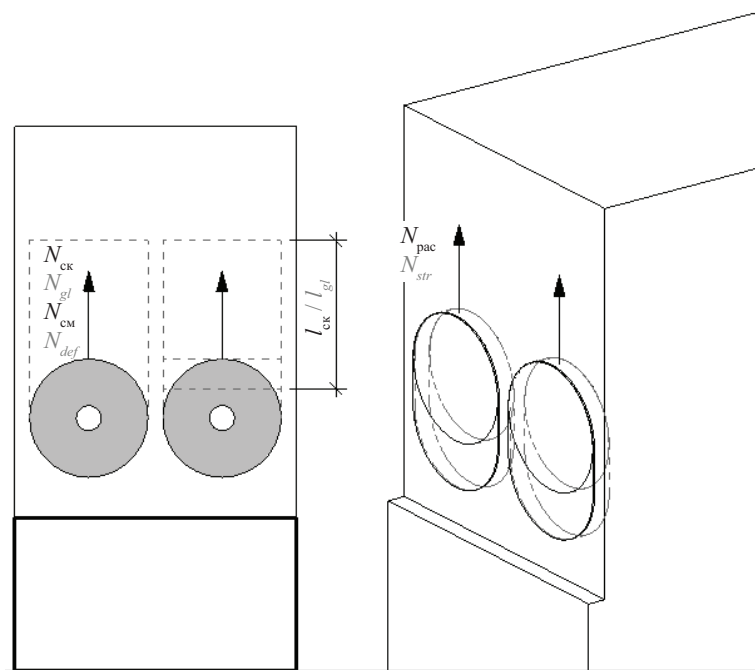


Рис. 4. Схема клеенных стальных шайб в древесине

Fig. 4. The scheme of glued steel washers in wood

где $R_{ск}$ — расчетное местное сопротивление скалыванию вдоль волокон в соединениях для максимального напряжения, определяемое по формуле:

$$R_{ск} = R_{ск}^A \cdot m_{дл} \cdot \prod m_i = 3,2 \cdot 0,8 \cdot 1 = 2,56 \text{ МПа}; \quad (27)$$

β — коэффициент, принимаемый в зависимости от типа нагружения конструкции. Принимаем $\beta = 0,25$.

При этом для безопасной эксплуатации конструкции нормы проектирования регламентируют величину отношения $\frac{l_{ск}}{e} > 3,0$.

Требование $\frac{l_{ск}}{e} > 3,0$ не выполняется из-за крайне малой величины заглубления клеенных шайб в древесину. Стяжные горизонтальные болты, стягивающие каждую пару шайб по обе стороны стойки между собой, не оказывают влияния на работу самой древесины. Для выполнения требования СП проведем усиление поперечного сечения стойки вводом дополнительных конструктивных саморезов 6×220 мм в количестве 4 шт. с каждой стороны.

Тогда уравнение (26) примет вид:

$$R_{ск}^c = \frac{2,56}{1 + 0,25 \cdot 0,57} = 2,24 \text{ МПа} = 22,9 \text{ кгс/см}^2.$$

Примем длину $l_{ск}$ не более 10-кратного заглубления в древесину шайб и определим расчетную площадь площадки скалывания:

$$F_{ск} = l_{ск} \cdot d_{ш} = 10 \cdot 8 = 80 \text{ см}^2. \quad (28)$$

Предельно допустимое усилие скалывания древесины вдоль волокон по формуле (25) для одной шайбы составит:

$$T_{ск} = 22,9 \cdot 80 = 1826,4 \text{ кгс}.$$

Для окончательного определения сопротивления древесины, которая стремится превратить свое изначально круглое углубление в продолговатый овал, как это показано на рис. 4, рассчитаем предельно допустимую нагрузку по смятию древесины вдоль волокон со стороны торца шайбы. Вычисленное значение необходимо сравнить с результатами расчета по скалыванию. Итоговое значение принимается по наименьшему из них.

Клеенная шайба работает на скалывание древесины вдоль волокон, определим предельно допустимую нагрузку:

$$T_{см} = R_{см} \cdot F_{см}, \quad (29)$$

где $R_{см}$ — расчетное сопротивление древесины смятию вдоль волокон.

Примем значение $R_{см}^A$ по табл. 3, а с учетом введения требуемых коэффициентов:

$$\begin{aligned} R_{см} &= R_{см}^A \cdot m_{дл} \cdot \prod m_i = 22,5 \cdot 0,8 \cdot 1 = \\ &= 18,0 \text{ МПа} = 183,5 \text{ кгс/см}^2. \end{aligned} \quad (30)$$

Расчетная площадь участка смятия древесины вдоль волокон будет равна произведению половины длины окружности шайбы на ее толщину:

$$F_{см} = \frac{2\pi R}{2} t_{ш} = 12,56 \cdot 1 = 12,56 \text{ см}^2. \quad (31)$$

Тогда, согласно формуле (29), предельно допустимое усилие смятия древесины вдоль волокон для одной шайбы составит:

$$T_{см} = 183,5 \cdot 12,56 = 2304,8 \text{ кгс.} \quad (32)$$

Итоговое сопротивление древесины в соединении определим как:

$$T_{дер} = \min(T_{см}; T_{ск}) = 1826,4 \text{ кгс.} \quad (33)$$

Теперь необходимо рассчитать вклад клееного соединения с древесиной в работу шайб.

Предельно допустимую нагрузку для клееной шайбы, работающей на скалывание древесины по клеевому шву вдоль волокон, установим аналогично расчету несущей способности самой древесины:

$$T_{ск,кл} = R_{ск,кл}^{cp} \cdot F_{ск,кл}, \quad (34)$$

где $R_{ск,кл}$ — расчетное сопротивление древесины скалыванию вдоль волокон в клеевых соединениях, определяемое как:

$$R_{ск,кл} = R_{ск}^A \cdot m_{дл} \cdot \prod m_i = 3,2 \cdot 0,8 \cdot 1 = 2,56 \text{ МПа} = 26,1 \text{ кгс/см}^2; \quad (35)$$

$F_{ск}$ — расчетная площадь площадки скалывания, равная площади шайбы.

Определим площадь шайб $d80$ с исключением отверстия под стяжной болт:

$$S_{ш} = \pi \cdot r_{ш}^2 - \pi \cdot r_{отв}^2; \quad (36)$$

$$S_{ш} = 3,14 \cdot 4^2 - 3,14 \cdot 0,9^2 = 50,24 - 2,54 = 47,7 \text{ см}^2.$$

Тогда для одной шайбы предельно допустимое усилие скалывания по клеевому шву будет равно:

$$T_{ск,кл} = 26,1 \cdot 47,70 = 1273,6 \text{ кгс.} \quad (37)$$

Общая несущая способность клееной шайбы с учетом включения в работу эпоксидного клея:

$$T_{шб} = T_{дер} + T_{ск,кл} = 1826,4 + 1273,6 = 3100,0 \text{ кгс.} \quad (38)$$

Общая несущая способность пары шайб, воспринимающих растягивающую составляющую усилия при разложении изгибающего момента, определим с дополнительным коэффициентом, равным 0,9, учитывающим их совместную работу в соединении:

$$T_{шб,общ} = T_{шб} \cdot \delta \cdot n = 3100 \cdot 0,9 \cdot 2 = 5580,0 \text{ кгс.} \quad (39)$$

7. Расчет общей несущей способности узла

По проведенным расчетам узловых элементов получены значения предельно допустимых нагрузок для каждого из них. Несущая способность всего соединения определяется по наименьшему из значений расчетных нагрузок составляющих его элементов.

Тогда общая несущая способность узла $T_{соед}$ на способность восприятия изгибающего момента:

$$T_{соед} = \min(T_{шб,верх}; T_{шп,верх}; T_{пл}; T_{бол}; T_{шб,общ}); \quad (40)$$

$$T_{соед} = \min(5368,2; 6028,8; 5817,5; 6719,6; 5580,0) \text{ кгс} = 5580,0 \text{ кгс.} \quad (41)$$

Подобранные конструктивные элементы узлового соединения обеспечивают равнопрочное соединение с эффективным использованием каждой его составляющей.

8. Расчет конечной несущей способности узла на действие изгибающего момента

После полученных результатов расчета несущей способности рассматриваемого узлового соединения на действие растягивающей составляющей изгибающего момента определим расчетное значение максимально допустимого изгибающего момента. Это необходимо для определения возможности применения принятого решения как типового для конструкций стропильных элементов.

После установления максимального изгибающего момента M_{max} проверим изначально принятые сечения для клееной стойки и стыкуемой над ней балки.

Определим возникающие в узле усилия растяжения и сжатия. Для этого разложим изгибающий момент на пару нормальных сил. Необходимо также рассчитать максимальные плечи сил сжатия e и растяжения t .

Согласно результатам, полученным в п. 6, вычислим максимально допустимое значение растягивающих усилий, после чего определим соответствующий ему изгибающий момент:

$$N_{рас} \leq T_{соед}. \quad (42)$$

Дополнительные коэффициенты действующих нормами не предусмотрены, но для более надежной работы конструкции введем коэффициент использования несущей способности $\vartheta = 0,9$, который повсеместно используется в реальной практике расчета конструкций. Тогда:

$$N_{рас} \leq T_{соед} \cdot \vartheta; \quad (43)$$

$$N_{рас\max} = 5580,0 \cdot 0,9 = 5022 \text{ кг} \sim 5000 \text{ кг.}$$

Вычислим допустимый изгибающий момент по полученному $N_{рас} = 5000 \text{ кг}$. Помимо изгибающих моментов узел также передает вертикальную составляющую нагрузки $N_{вер}$, однако она оказывает положительное влияние на работу жесткого соединения: центр тяжести эпюры нормальных напряжений сместится в большую сторону, усилие сжатия $N_{сж}$ станет преобладающим, частично сняв нагрузку с растянутой зоны. Наиболее опасным сочетанием будет вариант, при котором на стойку передается минимальное усилие сжатия и максимальный изгибающий момент.

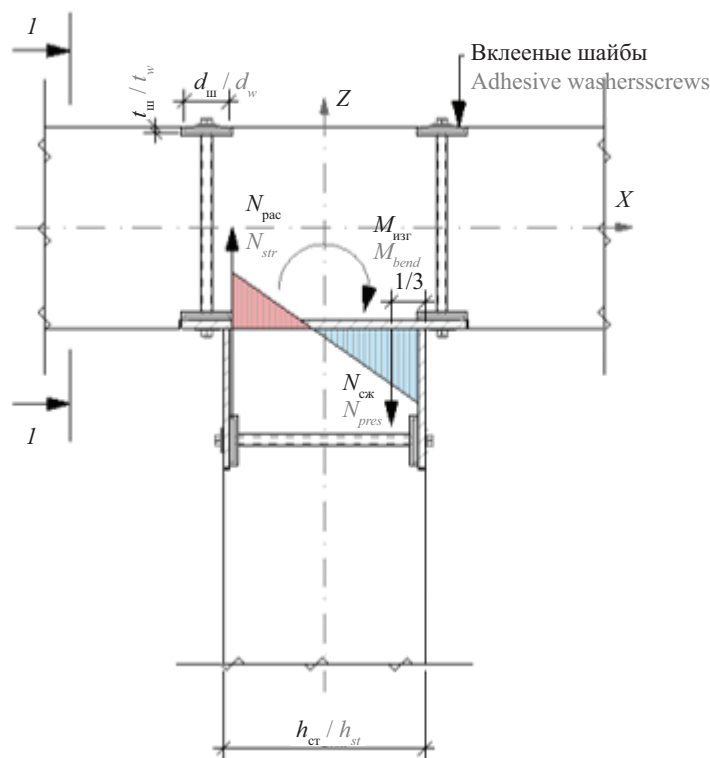


Рис. 5. Схема разложения усилий изгибающего момента

Fig. 5. Scheme of decomposition of bending moment forces

Порядок проведения разложения изгибающего момента представлен на рис. 5.

Так как принято, что вертикальная сила $N_{вер}$ отсутствует, максимальное напряжение равнозначно $\sigma_{с, \max} = \sigma_{рас, \max}$, а центр тяжести эпюры сжатия нормальных напряжений смещаться не будет. Тогда вычислим плечо до оси стойки по геометрии треугольника, центр тяжести которого находится на расстоянии $1/3$ от катетов, примыкающих к прямому углу.

В таком случае центр эпюры сжатия определим по формуле:

$$c_e = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1}{2} h_{ст} \right) = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 36 \right) = 6 \text{ см.} \quad (44)$$

На расстоянии e от края стойки расположена равнодействующая сил сжатия, а расстояние до равнодействующей сил растяжения определяется конструктивно. В рассматриваемом случае расстояние от вклеенных шайб до кромки стойки крайне мало, следовательно, восприятие равнодействующей силы растяжения происходит по центру оси через плечо сил растяжения t , что позволяет шайбам работать с наибольшей эффективностью.

Общую высоту при разложении изгибающего момента l_m найдем по формуле:

$$\begin{aligned} h_{изг} &= h_{ст} - c_e - t_{пл} - \left(\frac{t_{ш}}{2} \right) = \\ &= 36 - 6 - \left(\frac{1}{2} \right) = 28,5 \text{ см.} \end{aligned} \quad (45)$$

Тогда изгибающий момент, соответствующий максимально допустимому усилию растяжения $N_{рас}$, будет равен:

$$\begin{aligned} M_{\max} &= N_{рас, \max} \cdot h_{изг} = 5000 \cdot 28,5 = \\ &= 142\,500 \text{ кгс} \cdot \text{см} = 1425 \text{ кгс} \cdot \text{м}. \end{aligned} \quad (46)$$

Перейдем к определению геометрических характеристик принятых элементов в плоскости их изгиба. Момент сопротивления стойки с принятым сечением 190×360 мм составит:

$$W_{рас, ст} = \frac{bh^2}{6} = \frac{19 \cdot 36^2}{6} = 4104 \text{ см}^3. \quad (47)$$

Момент сопротивления балки сечением 190×400 мм:

$$W_{рас, блк} = \frac{bh^2}{6} = \frac{19 \cdot 40^2}{6} = 5067 \text{ см}^3. \quad (48)$$

Главный критерий прочности:

$$\frac{M_{\max}}{W_{рас}} \leq R_n, \quad (49)$$

где R_n — расчетное сопротивление древесины изгибу, определяемое как:

$$R_n = R_n^A \cdot m_{дл} \cdot \prod m_i; \quad (50)$$

$$R_n = 22,5 \cdot 0,8 \cdot 1 = 18 \text{ МПа} = 183,5 \text{ кгс/см}^2,$$

где $R_n^A = 22,5$ МПа — расчетное сопротивление изгибу клееной древесины для 2-го сорта, определяемое

по табл. 3¹; $m_{дл} = 0,8$ — коэффициент длительной прочности, соответствующий режиму длительно-сти загрузки Д, определяется по табл. 4¹; $\Pi m_i = 1$ — произведение коэффициентов условий работы, определяется по пункту 6.9¹.

Тогда по формуле (49) проведем проверку прочности изгибаемого элемента стойки:

$$142\,500/4104 \leq 183,5 \text{ кгс/см}^2;$$

$$34,72 \leq 183,5 \text{ кгс/см}^2.$$

Условие выполняется, коэффициент использования несущей способности 19 %.

Далее выполним проверку прочности изгибаемого элемента балки:

$$142\,500/5067 \leq 183,5 \text{ кгс/см}^2;$$

$$28,1 \leq 183,5 \text{ кгс/см}^2.$$

Условие выполняется, коэффициент использования несущей способности 16 %.

Как видно из расчета, прочность деревянных элементов обеспечивается с большим запасом, поэтому проверку элементов как сжато-изгибаемых проводить не будем.

9. Анализ возможности применения узлового решения на реальном примере из практики

Для оценки возможности использования предлагаемого узла на практике рассмотрим конструкцию двухшарнирной рамы с консольным выпуском верхнего ригеля. В данной конструкции в местах жесткого защемления стоек с фундаментом применялись жесткие узлы на клеенных арматурных стержнях.

Спроектированный объект представляет собой одноэтажное здание с двухэтажной центральной частью для хранения яхт. Размеры в осях $14,0 \times 28,0$ м. В качестве ограждающих конструкций применены каркасно-панельные стены на деревянном каркасе (цельная древесина) сечением $45 \times 145/195$ мм с шагом 627 мм. Жесткость конструкции обеспечена

обшивкой стен плитными материалами. Стропильная конструкция выполнена из доски сечением 45×195 мм.

Модель рассматриваемого объекта представлена на рис. 6.

В больших по площади и объему помещениях предусмотрены рамные конструкции с жесткими узлами для усиления протяженных стеновых панелей, а также для восприятия горизонтальных ветровых нагрузок. Запаса прочности обвязок рамных конструкций оказалось недостаточно для пролета 12,5 м.

Расположение рамных конструкций показано на рис. 7.

Рассматриваемая конструкция соответствует области применения разрабатываемого узла на клеенных шайбах. Для сравнения приведем описание имеющегося жесткого опорного узла на клеенных стержнях на рис. 8.

Металлическая деталь с арматурными выпусками изготавливается, а после клеивается на производстве в соответствии с требованиями всех технических регламентов. Далее на строительной площадке осуществляется сборка с применением сварки и химических анкеров для жесткого крепления стоек к фундаменту через закладные пластины.

Для более комплексного рассмотрения покажем конструкцию шарнирного узла соединения рамы (рис. 9).

С учетом запаса прочности изгибаемых элементов конструкции, сечения которой аналогичны принятым авторами ранее при разработке узла на клеенных шайбах, прочность всей конструкции будет определяться прочностью ее жестких узлов. Проведем анализ конструктивной схемы реальной рамы, определим усилия от изгибающего момента, а затем заменим жесткие опорные узлы с клеенными стержнями на шарнирные, а верхние шарнирные узлы на жесткие с клеенными шайбами.

Параллельно выполним расчеты еще двух схем с одним жестким узлом для первого и второго конькового соединения.

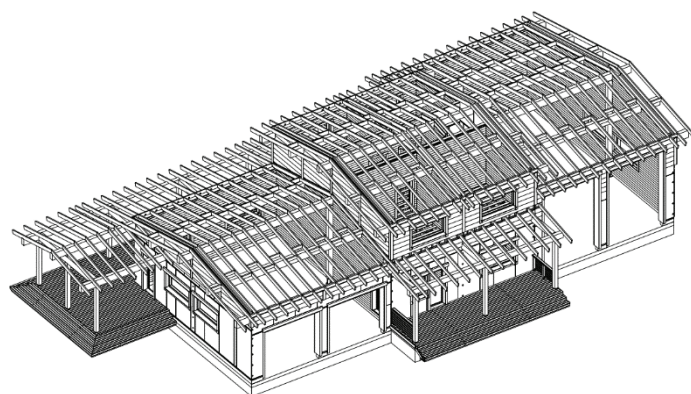


Рис. 6. Общий вид конструкции существующего здания

Fig. 6. General view of the existing building structure

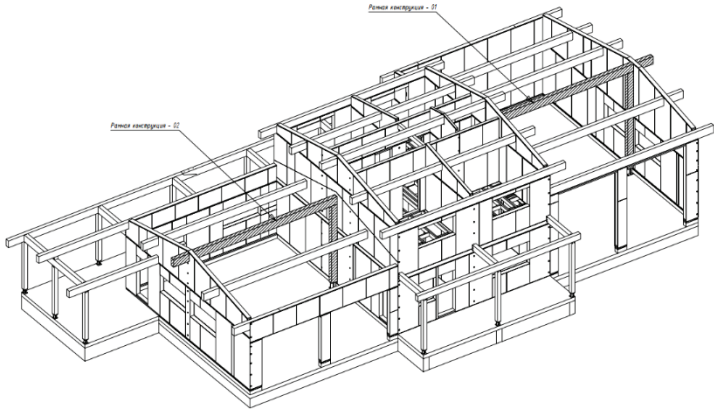


Рис. 7. Расположение жестких рам в каркасе здания
Fig. 7. The location of rigid frames in the building frame

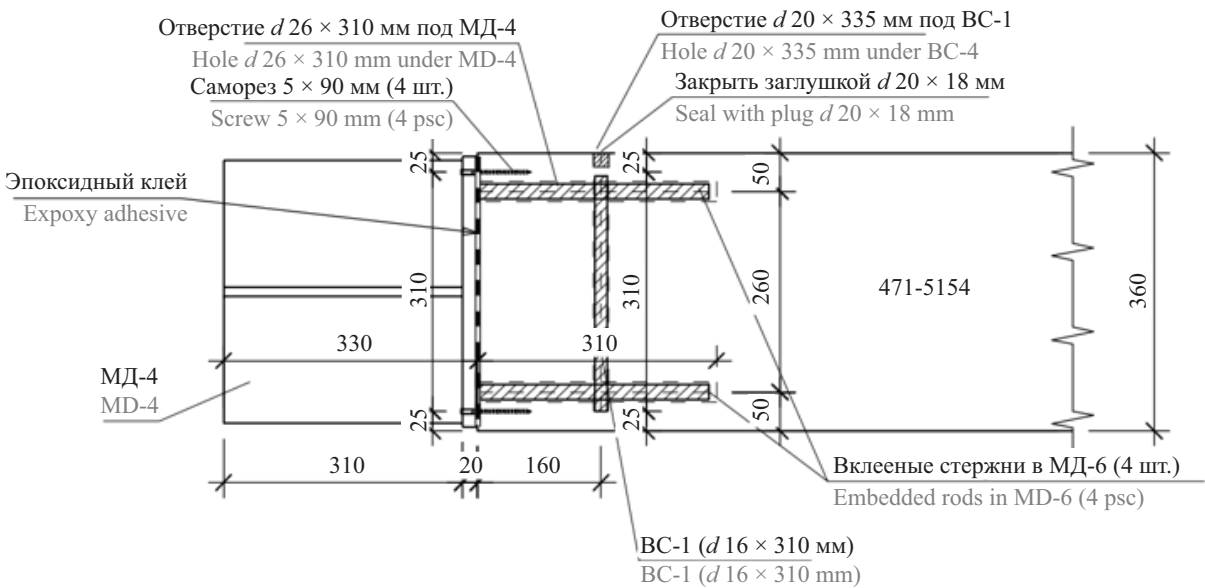


Рис. 8. Узловое решение верхнего жесткого узла соединения стойки с фундаментом
Fig. 8. Nodal solutions of the upper rigid junction of the rack with the foundation

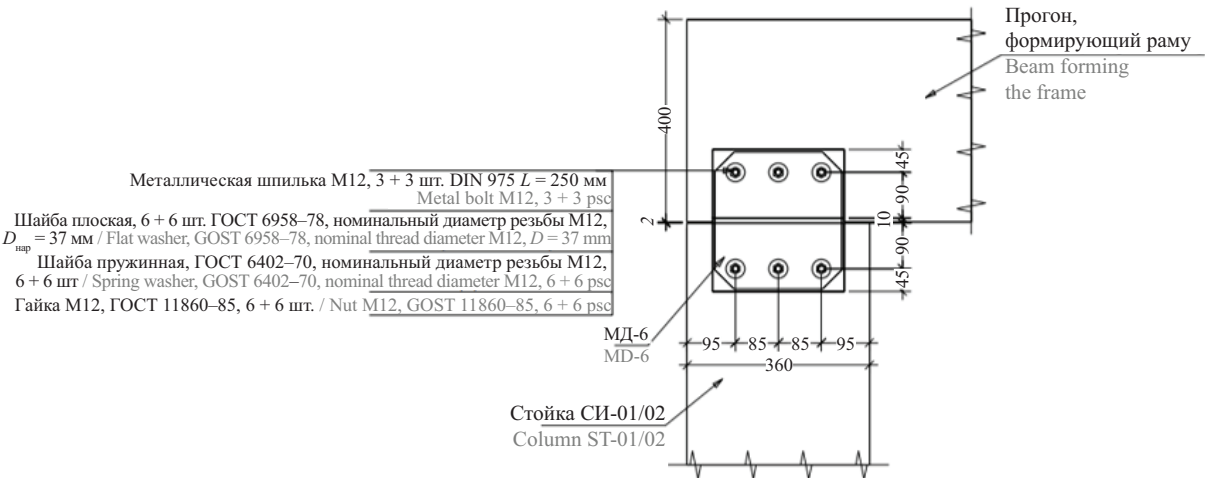


Рис. 9. Узловое решение верхнего шарнирного узла соединения балки со стойкой
Fig. 9. Nodal solutions of the upper hinge joint of the beam with the rack

Итого, имеем для анализа 4 расчетных схемы:

1. Рама с жестким закреплением двух опорных узлов и шарнирным закреплением двух коньковых узлов. Далее в рассмотрении будут рамы с шарнирным закреплением опорных узлов, но различным закреплением коньковых.
2. Рама с жестким закреплением двух коньковых узлов.
3. Рама с жестким закреплением одного конькового узла (правый).
4. Рама с жестким закреплением одного конькового узла (левый).

Комбинация загрузок С1, включающая собственный вес конструкции рамы и крыши, снеговую и ветровую нагрузки, представлена на рис. 10. Эта комбинация нагрузок соответствует табл. 4 [5] и относится к режиму загрузки Д (совместное действие постоянной и ветровой нагрузок или постоянной, снеговой и ветровой нагрузок), что было учтено при разработке узлового соединения на клеенных шайбах введением коэффициента $m_{дл} = 0,8$.

Начнем анализ расчета конструктивной схемы с определения первичных значений деформаций. Суммарные перемещения от действия нормативных значений нагрузок приведены на рис. 11.

Полученные результаты говорят о влиянии расположения и количества жестких узлов в конструкции на работу всей схемы. Введение в расчетную схему двух жестких коньковых узлов уменьшило вертикальные прогибы балки и привело к увеличению горизонтальных прогибов стойки, но в общем незначительно уменьшило суммарные перемещения относительно рамы с двумя жесткими опорными узлами.

С точки зрения полученных перемещений наиболее выгодным вариантом оказалась третья схема с жестким и шарнирным коньковым узлом. При этом жесткий узел должен располагаться в элементе, в котором не возникает собственный изгибающий момент от действия горизонтальных нагрузок (в нашем случае это ветровая нагрузка). Таким образом, жесткий узел рекомендуется размещать внутри здания, а не на фасаде.

Худшим вариантом стала четвертая рама, в которой жесткий узел размещен со стороны улицы. Суммарные перемещения превысили максимально допустимые в несколько раз.

В раме 3 суммарные перемещения получились значительно меньше, следовательно, данная рама наиболее оптимальна.

Оценим возможность применения разработанного узла на клеенных шайбах на примере рамы 3. Значение максимально допустимого изгибающего момента определили ранее в п. 8, $M_{\max 2} = 1425 \text{ кгс}\cdot\text{м}$, который дан для двух расчетных пар, клеенных в стойку шайб.

Максимальный изгибающий момент в узле для рамы 3 $M_{\max 3} = 2516 \text{ кгс}\cdot\text{м}$ (рис. 12).

Для обеспечения прочности узла необходимо внести небольшие изменения в его конструкцию. Добавим дополнительные две пары шайб, тогда полученная уточненная конструкция узла будет способна выдержать усилие:

$$M_{\max 4} = M_{\max 2} \cdot 2 = 1425 \cdot 2 = 2850 \text{ кгс}\cdot\text{м}. \quad (51)$$

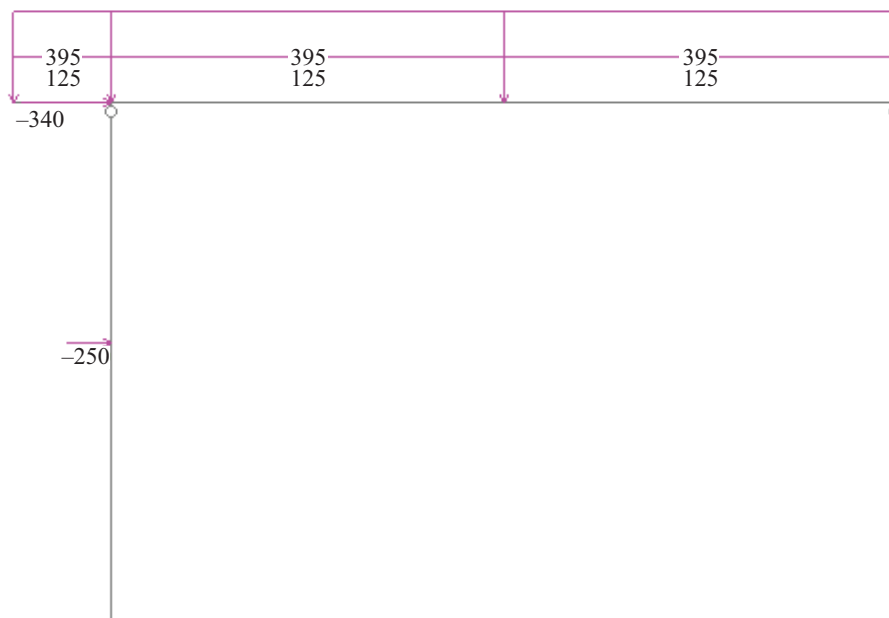


Рис. 10. Нагрузки в схеме для комбинации загрузок С1

Fig. 10. Loads in the scheme for the combination of loads C1

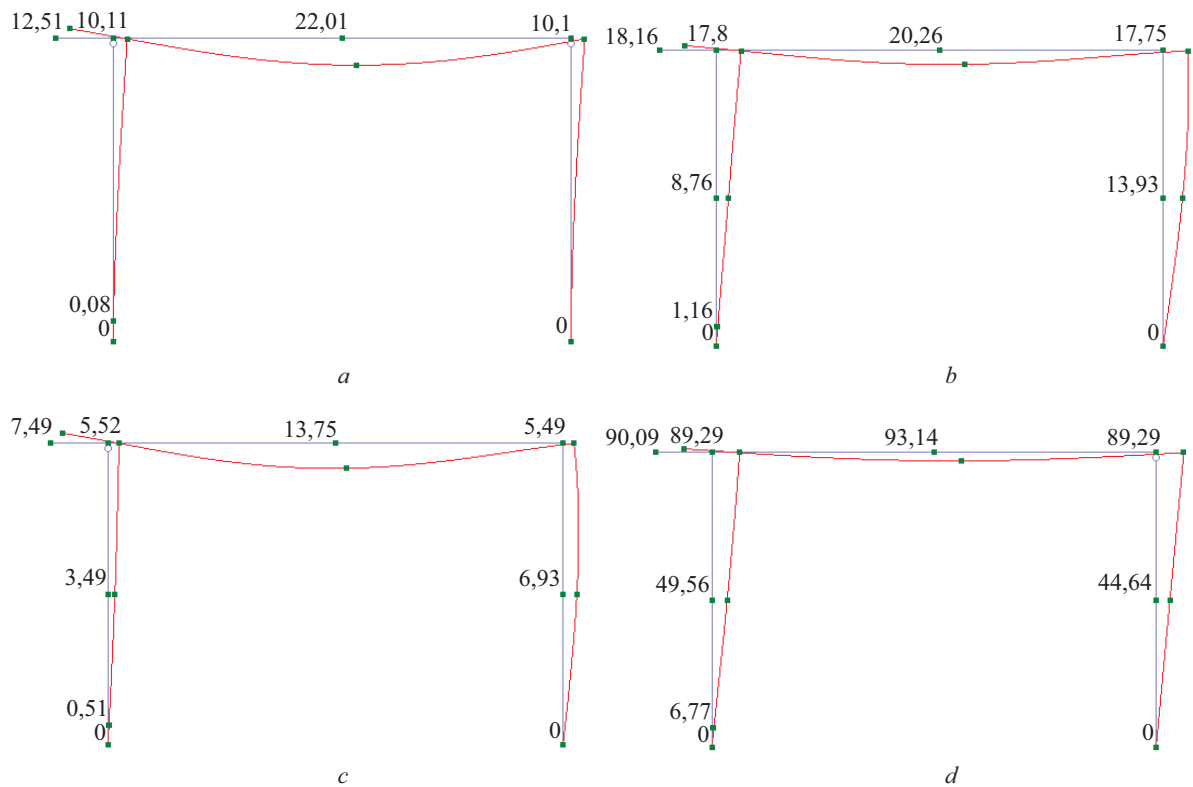


Рис. 11. Суммарные перемещения: *a* — рама 1; *b* — рама 2; *c* — рама 3; *d* — рама 4

Fig. 11. Total movements: *a* — frame 1; *b* — frame 2; *c* — frame 3; *d* — frame 4

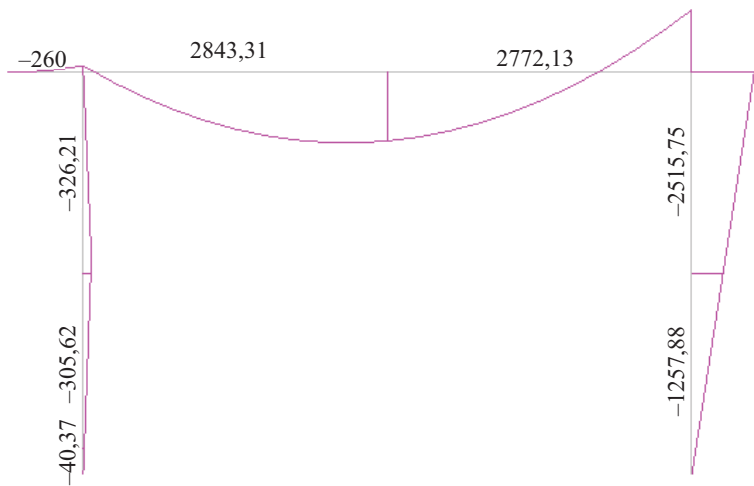


Рис. 12. Эпюры изгибающего момента для рамы 3

Fig. 12. Bending moment diagrams for frame 3

Выполним проверку прочности уточненного узла:

$$M_{\max 4} \geq M_{\max 3}; \tag{52}$$

$$2850 > 2516 \text{ кгс}\cdot\text{м}.$$

Условие прочности выполняется с коэффициентом использования несущей способности 88 %, следовательно, применение предложенного узла возможно в реальной практике.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При работе деревянных конструкций общая конечная прочность чаще всего определяется усилиями, которые способны воспринимать их узловые соединения. В исследовании была предложена принципиально новая конструкция жесткого узла соединения деревянных конструкций, основанная на достоинствах работы вклеенных в древесину стальных шайб. Применение разработанного узлового решения возможно в стро-

пильных системах зданий различного назначения. Главная причина введения в расчетную схему жестких узлов заключается в необходимости придания геометрической неизменяемости элементам, рассчитываемым на действие горизонтальных ветровых усилий.

Произведены расчеты следующих составляющих элементов узла на клеенных шайбах: опорных шайб; стяжных шпилек и опорной стальной пластины балки; сварных швов прикрепления вертикальных пластин к опорной; болтового соединения; клеенных шайб. По результатам проведенных расчетов посчитана конечная несущая способность узла (общая несущая способность на восприятие изгибающего момента составляет 5580 кгс), выполнен сравнительный анализ возможности применения предлагаемой конструкции узла методами численного моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый узел легче в изготовлении, чем аналогичные узлы на клеенных стрижнях.

Несущая способность композитного соединения, полученная в результате расчетов, позволяет ис-

ключить податливость, свойственную механическим связям в древесине без применения клея, а также значительно повышает прочность за счет включения в работу клевого шва.

Проведен анализ равнопрочности для каждого элемента соединения, а также определены их запасы прочности. Как и ожидалось, узловые связи более ответственные элементы в конструкции с меньшим запасом прочности (на 20 %), чем у соединяемых элементов.

Определено максимально допустимое для соединения значение (при одной паре шайб в узле) $M_{\max} = 1425 \text{ кгс}\cdot\text{м}$.

Возможность применения предлагаемого узла подтверждена методами численного моделирования на примере реального здания. Сделан вывод о важности выбора правильной комбинации жестких и шарнирных узлов для более эффективной работы конструкции.

Также не следует забывать о проверке возведенных конструкций на практике методами неразрушающего контроля.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Azzi Z., Al Sayegh H., Metwally O., Eissa M. Review of Nondestructive Testing (NDT) Techniques for Timber Structures // *Infrastructures*. 2025. Vol. 10. Issue 2. P. 28. DOI: 10.3390/infrastructures10020028
2. Золотов М.С. Исследование напряженно-деформированного состояния анкерного соединения на эпоксидном клее : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харьков, 1971.
3. Зубарев Г.Н., Бойтемиров Ф.А., Головина В.М. Испытание деревянной арки с соединениями на клеенных стержнях // *Известия вузов. Строительство и архитектура*. 1983. № 12. С. 15–21.
4. Иванов Ю.М. Длительная несущая способность деревянных конструкций // *Известия вузов. Строительство и архитектура*. 1972. № 11. С. 6–12.
5. Иванов Ю.М., Линьков И.М., Сороткин В.М. Исследование влияния армирования на прочность и жесткость деревянных изгибаемых элементов // *Разработка и исследование клееных деревянных и фанерных армированных конструкций*. 1972. № 24. С. 13–30.
6. Ковальчук Л.М. Склеивание древесных материалов с пластмассами и металлами. М. : Лесная промышленность, 1968. 239 с.
7. Калугин А.В. Клееные деревянные конструкции в современном строительстве // *Промышленное и гражданское строительство*. 2011. № 7–2. С. 32–37. EDN NXOUFJ.
8. Школяр Ф.С., Никитин А.Г., Зацепина А.И. Экспериментальное исследование клееного вдоль волокон древесины стержня // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 12. С. 1915–1925. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1915-1925. EDN LQVESG.
9. Зубарев Г.Н., Логинова М.П., Головина В.М. Испытание и расчет соединений деревянных конструкций : сб. науч. тр. М. : ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1981.
10. Турковский С.Б., Саятин В.В. Исследование монтажных узловых соединений клееных деревянных конструкций. М. : ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1981.
11. Турковский С.Б., Погорельцев А.А. Создание деревянных конструкций системы ЦНИИСК на основе наклонно клеенных стержней // *Промышленное и гражданское строительство*. 2007. № 3. С. 6–7. EDN HZIVXP.
12. Shchelokova T. A research of stress/strain condition of reinforced timber structures with natural weakenings // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 193. P. 03051. DOI: 10.1051/mateconf/201819303051
13. Jockwer R., Caprio D., Jorissen A. Evaluation of parameters influencing the load-deformation behaviour of connections with laterally loaded dowel-type fasteners // *Wood Material Science & Engineering*. 2022. Vol. 17. Issue 1. Pp. 6–19. DOI: 10.1080/17480272.2021.1955297
14. Jockwer R., Dietsch P. Review of design approaches and test results on brittle failure modes of connections loaded at an angle to the grain // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 171. Pp. 362–372. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.05.061

15. Mirski R., Kuliński M., Dziurka D., Thomas M., Antonowicz R. Strength properties of structural glulam elements from pine (*Pinus sylvestris* L.) timber reinforced in the tensile zone with steel and basalt rods // *Materials*. 2021. Vol. 14. Issue 10. P. 2574. DOI: 10.3390/ma14102574

16. Akter S.T., Serrano E., Bader T.K. Numerical modelling of wood under combined loading of compression perpendicular to the grain and rolling shear // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 244. P. 112800. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112800

17. Steilner M., Bläß H.J. A method to determine the plastic bending angle of dowel-type fasteners // *Materials and Joints in Timber Structures*. 2014. Pp. 301–306. DOI: 10.1007/978-94-007-7811-5_28

18. Franke S., Magnière N. The embedment failure of European beech compared to spruce wood and standards // *Materials and Joints in Timber Structures*. 2014. Pp. 221–229. DOI: 10.1007/978-94-007-7811-5_21

19. Schweigler M., Bader T.K., Hochreiner G., Lemaître R. Parameterization equations for the nonlinear connection slip applied to the anisotropic embedment behavior of wood // *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 142. Pp. 142–158. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.01.003

20. Bläß H.J., Colling F. Load-carrying capacity of dowelled connections // *INTER Meeting*. 2015. Pp. 115–129.

21. Franke S., Magnière N. Discussion of testing and evaluation methods for the embedment behaviour of connections // *INTER Meeting*. 2014. Pp. 93–102.

Поступила в редакцию 7 мая 2025 г.

Принята в доработанном виде 11 июня 2025 г.

Одобрена для публикации 11 июня 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Филипп Сергеевич Школяр — кандидат технических наук, старший преподаватель; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 6980-8774, ResearcherID: GLR-0652-2022, ORCID: 0000-0003-2872-0723; shkolyar.fs@gmail.com;

Максим Олегович Стародубцев — студент; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; starodubtsev.mo@edu.spbstu.ru;

Михаил Александрович Сафошкин — студент; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 3865-4952, ResearcherID: MGW-6965-2025, ORCID: 0009-0002-9138-4494; safoshkin_ma@spbstu.ru;

Андрей Александрович Астахов — студент; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; ResearcherID: MGW-7379-2025, ORCID: 0009-0004-7034-3495; astahov_aa@spbstu.ru.

Вклад авторов:

Школяр Ф.С. — идея, научное руководство, научное редактирование текста.

Стародубцев М.О. — сбор и обработка материала, написание исходного текста.

Сафошкин М.А. — сбор материала, обработка материала, доработка текста.

Астахов А.А. — доработка текста, написание и оформление статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Azzi Z., Al Sayegh H., Metwally O., Eisa M. Review of Nondestructive Testing (NDT) Techniques for Timber Structures. *Infrastructures*. 2025; 10(2):28. DOI: 10.3390/infrastructures10020028

2. Zolotov M.S. *Investigation of stress-strain state of anchor joint on epoxy glue : autoref. dis. ... candidate of technical sciences*. Kharkov, 1971. (rus.).

3. Zubarev G.N., Boitemirov F.A., Golovina V.M. Test of a wooden arch with joints on glued rods. News of Higher Educational Institutions. *Construction and Architecture*. 1983; 12:15-21. (rus.).

4. Ivanov J.M. Long-term bearing capacity of wooden structures. *News of Higher Educational Institutions*. Construction and Architecture. 1972; 11:6-12. (rus.).

5. Ivanov Yu.M., Linkov I.M., Sorotkin V.M. Study of the influence of reinforcement on the strength and rigidity of wooden bent elements. *Development and study of glued wooden and plywood reinforced structures*. 1972; 24:13-30. (rus.).

6. Kovalchuk L.M. *Gluing wood materials with plastics and metals*. Moscow, Forestry industry, 1968; 239. (rus.).

7. Kalugin A.V. Glued timber structures in modern construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2011; 7-2:32-37. EDN NXOUFJ. (rus.).

8. Shkoliar F.S., Nikitin A.G., Zatsepina A.I. Experimental research of a rod glued along wood fibres. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(12):1915-1925.

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1915-1925. EDN LQVESG. (rus.).

9. Zubarev G.N., Loginova M.P., Golovina V.M. *Testing and calculation of connections of wooden structures : collection of scientific works*. Moscow, TsNIISK named after V.A. Kucherenko, 1981. (rus.).

10. Turkovsky S.B., Sayapin V.V. *Research of assembly joints of glued wooden structures*. Moscow, TsNIISK named after V.A. Kucherenko, 1981. (rus.).

11. Turkovsky S.B., Pogoreltsev A.A. Development of wooden structures of “TSNIISK-system” based on inclined stuck-in rods. *Industrial and Civil Engineering*. 2007; 3:6-7. EDN HZIVXP. (rus.).

12. Shchelokova T. A research of stress/strain condition of reinforced timber structures with natural weakenings. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 193:03051. DOI: 10.1051/mateconf/201819303051

13. Jockwer R., Caprio D., Jorissen A. Evaluation of parameters influencing the load-deformation behaviour of connections with laterally loaded dowel-type fasteners. *Wood Material Science & Engineering*. 2022; 17(1):6-19. DOI: 10.1080/17480272.2021.1955297

14. Jockwer R., Dietsch P. Review of design approaches and test results on brittle failure modes of connections loaded at an angle to the grain. *Engineering Structures*. 2018; 171:362-372. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.05.061

15. Mirski R., Kuliński M., Dziurka D., Thomas M., Antonowicz R. Strength properties of structural glulam

elements from pine (*Pinus sylvestris* L.) timber reinforced in the tensile zone with steel and basalt rods. *Materials*. 2021; 14(10):2574. DOI: 10.3390/ma14102574

16. Akter S.T., Serrano E., Bader T.K. Numerical modelling of wood under combined loading of compression perpendicular to the grain and rolling shear. *Engineering Structures*. 2021; 244:112800. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112800

17. Steilner M., Blaß H.J. A method to determine the plastic bending angle of dowel-type fasteners. *Materials and Joints in Timber Structures*. 2014; 301-306. DOI: 10.1007/978-94-007-7811-5_28

18. Franke S., Magnière N. The embedment failure of European beech compared to spruce wood and standards. *Materials and Joints in Timber Structures*. 2014; 221-229. DOI: 10.1007/978-94-007-7811-5_21

19. Schweigler M., Bader T.K., Hochreiner G., Lemaître R. Parameterization equations for the nonlinear connection slip applied to the anisotropic embedment behavior of wood. *Composites Part B: Engineering*. 2018; 142:142-158. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.01.003

20. Blaß H.J., Colling F. Load-carrying capacity of dowelled connections. *INTER Meeting*. 2015; 115-129.

21. Franke S., Magnière N. Discussion of testing and evaluation methods for the embedment behaviour of connections. *INTER Meeting*. 2014; 93-102.

Received May 7, 2025.

Adopted in revised form on June 11, 2025.

Approved for publication on June 11, 2025.

BIONOTES: **Filipp S. Shkoliar** — Candidate of Technical Sciences, senior lecturer; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 6980-8774, ResearcherID: GLR-0652-2022, ORCID: 0000-0003-2872-0723; shkoliar.fs@gmail.com;

Maxim O. Starodubcev — student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; office@spbstu.ru, starodubtsev.mo@edu.spbstu.ru;

Mikhail A. Safoshkin — student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 3865-4952, ResearcherID: MGW-6965-2025, ORCID: 0009-0002-9138-4494; safoshkin_ma@spbstu.ru;

Andrey A. Astahov — student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ResearcherID: MGW-7379-2025, ORCID: 0009-0004-7034-3495; astahov_aa@spbstu.ru.

Contribution of the authors:

Filipp S. Shkoliar — idea, academic advising, scientific editing of the text.

Maxim O. Starodubcev — data gathering and processing, experiment making, writing of the original text.

Mikhail A. Safoshkin — data gathering and processing, experiment making, text revision.

Andrey A. Astahov — text revision, writing of the article.

The authors declare no conflict of interest.

Электрохимические и физико-механические свойства композитов на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего

Хамза Абдулмалек Кайс¹, Нина Николаевна Морозова²

¹ Университет Саны; г. Сана, Йеменская Республика;;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение смешанных вяжущих с повышенным содержанием активных минеральных добавок (МД) позволяет улучшить ряд важнейших физико-механических свойств бетона. Однако снижение доли клинкера для конструктивных бетонов может негативно сказаться на долговечности железобетонного изделия и сооружения в целом вследствие потенциального понижения pH поровой жидкости бетона. Гипсоцементно-пуццолановые вяжущие (ГЦПВ) относятся к материалам с малым клинкерным фондом, поскольку в их составе преобладает гипсовое вяжущее, имеющее кислую среду. Поэтому при внедрении в производство несущих изделий и конструкций необходимо проверять защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре.

Материалы и методы. Для приготовления ГЦПВ использовали гипсовое вяжущее марки Г-5, цементное марки ЦЕМ I 42,5Н и пуццолановые МД: природный цеолит, отходы промышленности: микрокремнезем и зола-уноса. Методами потенциометрическими и кондуктометрическими исследованы величины pH и ионной концентрации гидратированных суспензий с различными активными МД, как моно-, так и бинарными их модификациями. Прочность на сжатие оценивали после 7, 28 и 90 сут твердения в соответствии с ГОСТ 10180–2012; водопоглощение — по методике ГОСТ 23789–2018; водостойкость — по коэффициенту размягчения.

Результаты. В результате проведенных экспериментов получен состав ГЦПВ с высокими защитными и физико-механическими свойствами, который может быть использован для изготовления конструкционного быстротвердеющего бетона.

Выводы. Полученные результаты свидетельствуют о достаточных защитных свойствах бетонов на основе ГЦПВ по отношению к стальной арматуре: показатель pH не менее 12 и состав, содержащий 60 % гипсового вяжущего, 25 % портландцемента и бинарную активную МД на основе микрокремнезема и природного цеолита при их соотношении 2:1 по массе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гипсоцементно-пуццолановое вяжущее, потенциометрия, кинетические кривые pH, кондуктометрия, кинетические кривые электропроводности, активная минеральная добавка, коррозия, прочность при сжатии, водостойкость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кайс Х.А., Морозова Н.Н. Электрохимические и физико-механические свойства композитов на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 9. С. 1330–1342. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1330-1342

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

Electrochemical and physical-mechanical properties of composites based on gypsum-cement-pozzolan binder

Hamza A. Qais¹, Nina N. Morozova²

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

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

ABSTRACT

Introduction. The use of mixed binders with an increased content of active mineral additives allows improving a number of the most important physical and mechanical properties of concrete. However, a decrease in the proportion of clinker for structural concrete may negatively affect the durability of the reinforced concrete product and the structure as a whole, due to a potential decrease in the pH of the pore liquid of the concrete. Gypsum cement-pozzolan binders are materials with a small clinker fund, since gypsum binder, which has an acidic environment, predominates in their composition. Therefore, when introducing load-bearing products and structures into production, it is necessary to check the protective properties of concrete in relation to steel reinforcement.

Materials and methods. To prepare the gypsum-cement-pozzolan binder, we used gypsum binder of grade G-5, cement binder of grade CEM I 42.5N and pozzolan mineral additives: natural zeolite, microsilica and fly ash. The pH and ionic concentration values of hydrated suspensions with various active mineral additives, both mono- and binary modifications, were

studied using potentiometric and conductometric methods. Compressive strength was estimated after 7, 28 and 90 days of hardening in accordance with GOST 10180–2012; water absorption — according to the method of GOST 23789–2018; water resistance was estimated by the softening coefficient.

Results. As a result of the experiments, a composition of gypsum-cement-pozzolan binder with high protective and physical-mechanical properties was obtained, which can be used for the production of structural quick-hardening concrete.

Conclusions. The obtained results indicate sufficient protective properties of concrete based on gypsum-cement-pozzolan binders in relation to steel reinforcement: a pH of at least 12 and a composition containing 60 % gypsum binder, 25 % Portland cement and a binary active mineral additive based on microsilica and natural zeolite in a ratio of 2:1 by weight.

KEYWORDS: gypsum cement-pozzolan binder, potentiometry, pH kinetic curves, conductometry, electrical conductivity kinetic curves, active mineral additive, corrosion, compressive strength, water resistance

FOR CITATION: Qais H.A., Morozova N.N. Electrochemical and physical-mechanical properties of composites based on gypsum-cement-pozzolan binder. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(9):1330-1342. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1330-1342 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время к цементным бетонам, являющимся одним из основных конструктивных строительных материалов, предъявляют высокие требования по расходу материальных и энергетических ресурсов [1–3]. Экономия цемента, как дорогостоящего компонента бетона, связана с необходимостью поиска новых путей модификации неорганических вяжущих веществ [4–6]. С развитием аддитивных технологий появляется интерес к технологичным бетонам на основе гипсоцементных композиций, которые позволяют в значительной степени снизить стоимость готовой продукции и соответственно повысить ее конкурентоспособность [7–9]. К таким материалам можно отнести гипсоцементно-пуццолановые вяжущие (ГЦПВ), гипсошлаково-пуццолановые (ГШВ), композиционные гипсовые вяжущие (КГВ) и т.п., но они не обделены недостатками [10]. Их многокомпонентный состав может быть не только с высокой деформативностью и низкой долговечностью из-за образования высокоосновной формы гидросульфаталюмината кальция $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot (31 - 32) \cdot \text{H}_2\text{O}$ в затвердевшей структуре, но и иметь низкий уровень щелочности поровой жидкости камня, что способствует коррозии металлических армирующих элементов.

Коррозия стальной арматуры в бетоне, как известно [11–13], является результатом электрохимического процесса, который происходит при контакте металлической поверхности с водными растворами

электролитов. Особенность электрохимической коррозии заключается также в том, что окисление (ионизация) атомов металла и восстановление окислителя протекают в виде двух сопряженных реакций на различных участках поверхности металла (аноде и катоде), сопровождающихся возникновением между этими участками электродвижущей силы (ЭДС) и протеканием электрического тока¹ (рис. 1).

Оптимальным условием для обеспечения долговечности железобетонных конструкций служит пассивное состояние стали, при котором арматура не подвержена коррозии при любом уровне влажности бетона. Это пассивное состояние арматуры сохраняется до тех пор, пока pH поровой влаги в бетоне не снизится ниже 11,8 или содержание ионов-активаторов, таких как хлорид-ионы, не превысит критическое значение от 0,1 до 0,4 % по массе цемента [14]. Поэтому качественный армированный конструкционный бетон должен быть высокощелочным, чтобы обеспечивались условия для пассивации коррозионных процессов арматурной стали в железобетонных изделиях. Основные факторы, влияющие на нарушение пассивной пленки на ме-

¹ Маринин А.Н., Гарибов Р.Б., Овчинников И.Г. Сопротивление железобетонных конструкций воздействию хлоридной коррозии и карбонизации. Саратов : Издат. центр «РАТА», 2008. 296 с.

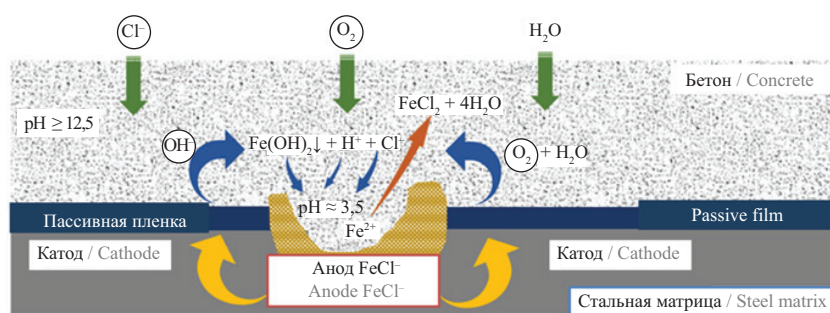


Рис. 1. Условия возникновения коррозии стальной арматуры

Fig. 1. Conditions for the occurrence of corrosion of steel reinforcement

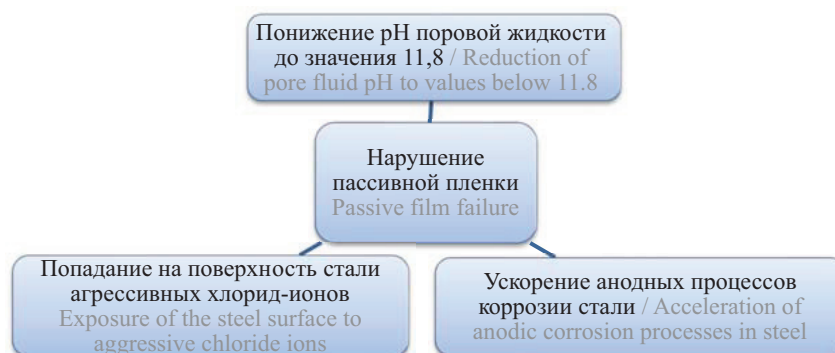


Рис. 2. Причины нарушения пассивной пленки, обеспечивающей защиту металла

Fig. 2. Causes of damage to the passive film providing protection to the metal

таллической поверхности и обеспечивающие ее защиту², показаны на рис. 2.

Не следует исключать, что коррозионные процессы стальной арматуры в бетоне могут появиться из-за наличия в нем трещин, которые станут проводниками коррозионной среды к арматуре, а также из-за коррозии цементирующего камня бетона, наличия блуждающих токов и недостаточной толщины слоя бетона.

Известно, что цементный камень в бетоне характеризуется pH от 12,0 до 13,8 и поэтому на поверхности стальной арматуры образуется тонкий пассивирующий слой, который предотвращает коррозию арматурной стали [11, 15]. Снижение защитных свойств цементного бетона по отношению к стальной арматуре возможно за счет процесса карбонизации, при котором гидроксид кальция в бетоне преобразуется в карбонат кальция, с понижением pH поровой жидкости до уровня pH ~9,0–9,5.

Цемент в составе ГЦПВ оказывает также значительное воздействие на защитные характеристики бетона по отношению к стальной арматуре, влияя как на способность связывать углекислый газ (CO_2), так и на диффузионное сопротивление проникновения CO_2 . Увеличение содержания щелочных продуктов гидратации в бетоне на основе ГЦПВ способствует большему связыванию CO_2 и замедлению продвижения фронта карбонизации вглубь материала. В то же время ГЦПВ с пуццолановыми добавками существенно снижают количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$ из-за реакций с компонентами добавки, что может ускорить процесс карбонизации.

В работе [16] показано, что процессы, происходящие при гидратации и твердении гипсового вяжущего в присутствии щелочного компонента, наглядно и информативно отображаются на кинетических кривых изменения pH, полученных потенциометрическим методом контроля процессов гидратации

и твердения вяжущих веществ и величины pH — характеристики, от которой зависит растворимость сульфата кальция. Наиболее оптимальными являются условия гидратации, при которых величина pH в начальные сроки находится в слабокислой области (pH = 6,3–6,7), затем переходящей в нейтральную среду. Причем установлено, что в щелочной среде влияние генезиса гипсового сырья несколько сглаживается, а в кислой среде, наоборот, усиливается. Но наиболее эффективный способ повышения водостойкости гипсового вяжущего — уменьшение растворимости в воде сульфата кальция путем введения в состав ГЦПВ различных активных минеральных добавок [17–19].

Анализом литературных данных по защитным свойствам бетона на основе гипсоцементных композиций по отношению к стальной арматуре выявлено, что существует значительное многообразие их составов и отсутствуют зависимости изменения величины pH и ионной концентрации минеральных суспензий в различные сроки твердения. В связи с вышеизложенным цель работы — оценка электрохимических и физико-механических свойств различных составов ГЦПВ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для приготовления ГЦПВ использовали гипсовое и цементное вяжущие и пуццолановые минеральные добавки (МД): природный цеолит, микрокремнезем (МК) и зола-уноса (ЗУ), следующих характеристик:

- гипсовое вяжущее (ГВ) марки Г-5 производства ООО Develop a nation (Йеменская Республика), соответствующее требованиям стандарта EN 13279-1:2008, физико-механические свойства которого представлены в табл. 1;

- цементное вяжущее — портландцемент (ПЦ) марки ЦЕМ I 42,5Н Amran cement (Йеменская Республика), удовлетворяющий стандарту ASTM C150 Type 1, минеральный состав по паспорту качества приведен в табл. 2, а его физико-механические свойства — в табл. 1;

² Овчинникова Т.С., Маринин А.Н., Овчинников И.Г. Коррозия и антикоррозионная защита железобетонных мостовых конструкций // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. Вып. № 5.

Табл. 1. Физико-механические свойства вяжущих
Table 1. Physical and mechanical properties of binders

Наименование показателя / Name of the indicator	Единица измерения Unit of measurement	Значение показателя для: The value of the indicator for:	
		гипса / gypsum	цемента / cement
Тонкость помола / Grinding fineness: • остаток на сите № 02 / residue on sieve No. 02; • остаток на сите № 008 / residue on sieve No. 008	%	4,5 –	– 6
Нормальная плотность / Normal density	%	55	27–28
Сроки схватывания / Setting time: • начало / start; • конец / end	ч:мин / h:min	0:6 0:12	2:55 3:40
Предел прочности при изгибе / Bending strength: • через 2 ч / after 2 hours; • в высушенном до постоянной массы / in dried to constant weight; • через 28 сут / after 28 days	МПа / MPa	2,9 5,5 –	– – 7,0
Предел прочности при сжатии / Compressive strength: • через 2 ч / after 2 hours; • в высушенном до постоянной массы / in dried to constant weight; • через 28 сут / after 28 days	МПа / MPa	5,35 13,8 –	– – 48,5
Прочность при сжатии после пропаривания Compressive strength after steam curing	МПа / MPa	–	38,4
Коэффициент размягчения / Softening coefficient	–	0,31	–

Табл. 2. Минералогический состав портландцемента
Table 2. Mineralogical composition of Portland cement

Наименование цемента / Name of cement	Минеральный состав клинкера, % / Mineral composition of clinker, %			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Amran cement (ЦЕМ I 42,5Н) (CEM I 42.5N)	53,8	20,9	6,4	12,04

- микрокремнезем с Саудовского металлургического комбината BUILMIX в виде порошка с частицами сферической формы размером 0,01–0,1 мкм, имеющий удельную поверхность 38 000 см²/г и пуццолановую активность 1210 мг/г;
- зола-уноса, соответствующая требованиям ГОСТ 25818–2017 и полученная от фирмы BUILMIX Саудовской Аравии с влажностью 1,15 %, имеющая удельную поверхность 29 500 см²/г и пуццолановую активность 970 мг/г;
- природный цеолит (ЦЕО) с предприятия Yemen zeolite в г. Сана (Йеменская Республика) в виде зерни-

стого рассыпчатого материала светло-зеленого цвета с наибольшим размером зерен 1 мм; перед использованием в экспериментах его высушивали и измельчали до порошкообразного состояния с удельной поверхностью 6500 см²/г, его пуццолановая активность составила 815 мг/г. Химические составы материалов представлены в табл. 3.

Методы испытания

- В работе использованы общепринятые и стандартные методики:
- исследование pH-среды гидратирующихся минеральных суспензий осуществляли с помощью

Табл. 3. Химический состав цемента и МД, входящих в состав ГЦПВ
Table 3. Chemical compositions of cement and active mineral additives

Название вещества / Name of the substance	Количество, % / Quantity, %									
	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MnO	SO ₃
ПЦ / PC	20,59	63,35	2,94	3,77	–	4,96	–	–	–	1,96
МК / SF	94,49	0,5	0,62	0,1	0,09	0,07	0,7	–	–	–
ЗУ / FA	53,8	5,7	2,3	5,2	0,6	26,72	0,7	1,4	–	–
ЦЕО / ZEO	71,3	0,89	0,43	3,44	0,99	11,12	2,69	0,22	0,02	–



Рис. 3. Оборудование для измерения ГЦПВ суспензий: *a* — на рН-показатель; *b* — на электропроводимость
Fig. 3. Equipment for measuring the GCPB of suspensions: *a* — for the pH indicator; *b* — for electrical conductivity

стационарного рН-метра марки рН-618 (рис. 3), производства HANNA Instruments (Германия). Значение рН водных суспензий определяли на составах при соотношении Т/Ж = 1:1 в сроки: 1, 4, 7, 14, 21, 45, 60 и 90 сут твердения;

- электропроводность суспензий измеряли с помощью кондуктометра марки Nach Sension 378 (рис. 3);
- подвижность оценивали по диаметру расплыва смеси по ГОСТ 23789–2018 с использованием прибора Суттарда;
- прочность на сжатие камня из ГЦПВ оценивали после 28 сут твердения в соответствии с ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» на образцах-кубиках с размерами ребра 7 см;
- водопоглощение камня из ГЦПВ — по методике ГОСТ 23789–2018;
- водостойкость ГЦПВ бетона оценивали по коэффициенту размягчения, который рассчитывали

из отношения предела прочности на сжатие образцов в водонасыщенном состоянии (водонасыщение производили в течение 48 ч) к пределу прочности на сжатие образцов в сухом состоянии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первоначально изучены измеренные показатели рН и электропроводности в процессе твердения индивидуальных вяжущих и в составе ГЦПВ. Базовый состав ГЦПВ, определенный в исследовании [19], следующий — ГВ:ПЦ:АМД = 60:25:15 % по массе. Исследуемые составы приведены в табл. 4, результаты — на рис. 4–7.

При гидролизе и гидратации гипса (рис. 4, *a*) наблюдается небольшое колебание рН среды, значение которой находится в диапазоне от 6,55 до 6,86. Если на графиках для гипсового вяжущего небольшой уклон кривой рН отмечается в сторону умень-

Табл. 4. Составы исследуемых композиций
Table 4. Compositions of the studied compositions

Условное обозначение состава Conventional designation of composition	Состав ГЦПВ, % по массе / Composition of GCPB, % by weight				
	ГВ / GB	ПЦ / PC	МК / SF	ЦЕО / ZEO	ЗУ / FA
G	100	0	0	0	0
C	0	100	0	0	0
G > C	70	30	0	0	0
G = C	50	50	0	0	0
G < C	30	70	0	0	0
GCS	60	25	15	–	–
GCF	60	25	–	15	0
GCZ	60	25	–	–	15
GCP1	60	25	10	0	5
GCP2	60	25	7,5	0	7,5
GCP3	60	25	5	0	10
GCP4	60	25	10	5	0
GCP5	60	25	7,5	7,5	0
GCP6	60	25	5	10	0
GCP7	60	25	0	10	5
GCP8	60	25	0	7,5	7,5
GCP9	60	25	0	5	10

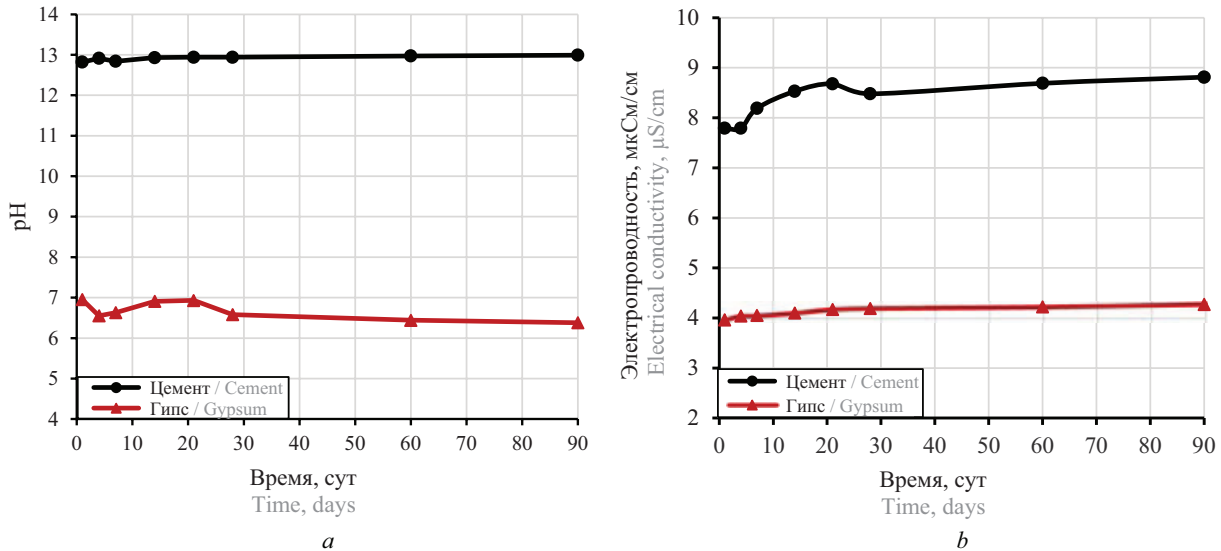


Рис. 4. Динамика изменения pH среды и электропроводности гидратирующихся цемента и гипса

Fig. 4. Dynamics of changes in pH and electrical conductivity of hydrating cement and gypsum

шения значения, то для цемента — в сторону увеличения от 12,71 до 13.

Результаты по электропроводности (рис. 4, b) показывают схожую закономерность с pH. Для цементных паст значения электропроводности варьируются в диапазоне от 7,79 до 8,81 мкСм/см, а для гипсовых — от 3,96 до 4,27 мкСм/см.

На следующем этапе работы проведено исследование изменения pH среды при гидратации гипсоцементных композиций при соотношении гипса к цементу: 1:2,33; 1:1 и 2,33:1. Результаты представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, a, добавление гипса в цемент приводит к уменьшению pH, вероятно, это за счет перевода высокоосновных гидроалюминатов

(ферритов) кальция в низкоосновные, что является фактом уменьшения концентрации гидроксид-ионов водорода $[\text{OH}^-]$ в растворе, единственным «поставщиком» которых служит $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [20]. Наибольший показатель pH среды, равный 12,82, имеет суспензия с 70 % цемента. Эта закономерность связана с большим количеством $\text{Ca}(\text{OH})_2$, выделяющимся в результате гидратации силикатных фаз клинкера. Более низкие показатели pH наблюдаются при замене части портландцемента до 50 % гипсовым вяжущим. При этом количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в продуктах гидратации уменьшается и вместе с этим снижается и показатель pH до 12,56. Наименьшее значение pH среды, равное 11,91, имеет состав с 70 % гипса и 30 % цемента.

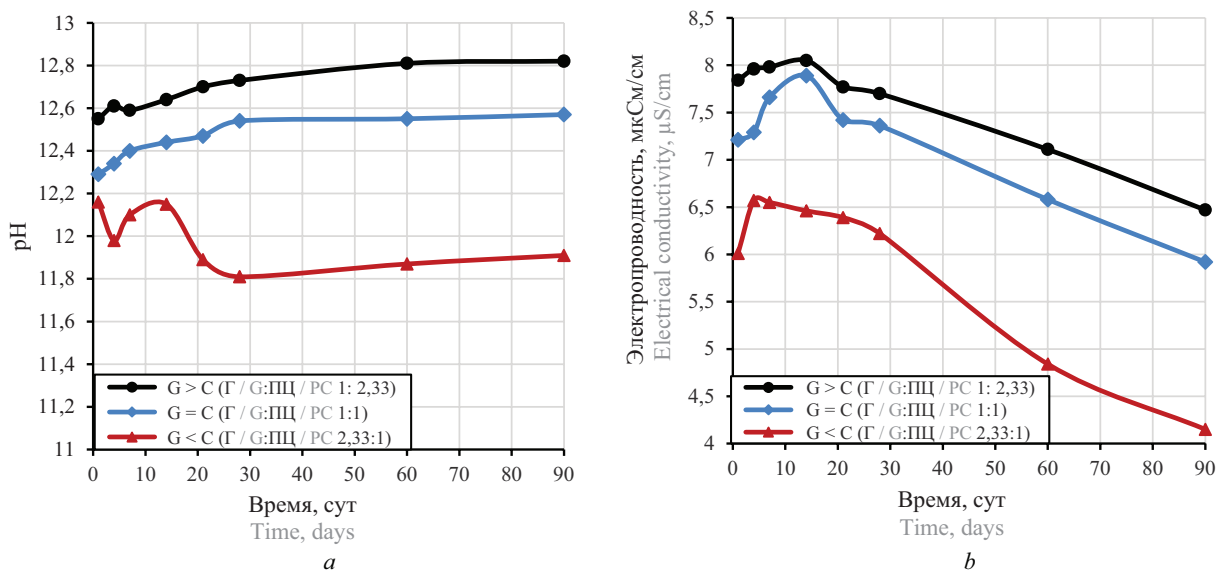


Рис. 5. Динамика изменения pH среды и электропроводности гидратирующихся цементно-гипсовых композиций

Fig. 5. Dynamics of changes in pH and electrical conductivity of hydrating cement-gypsum compositions

Итак, в составе цементно-гипсовой композиции при равном их соотношении, влияние гипса на щелочность ограничено.

Результаты электропроводности (рис. 5, б) показывают более высокие значения проводимости для смеси с большим содержанием цемента на начальном этапе (до 14 сут) гидратации, далее наблюдается резкое снижение. Наименьшее снижение электропроводности получено в составе с большим содержанием гипса, также в этом составе снижение электропроводности начинается после четвертых суток твердения и значения варьируются от 6,01 до 4,15 мкСм/см. Из полученных данных следует, что при замене до 50 % цемента гипсом щелочность камня изменяется не критично.

Далее проведены исследования влияния вида МД на показатель рН среды и электропроводность ГЦПВ суспензий. Результаты представлены на рис. 6.

Как видно из рис. 6, а, наибольшее значение рН, равное 12,55, имеет состав ГЦПВ с МК на 14-е сут твердения, а на 90-е сут оно снизилось до 12,29. Более низкие значения рН, равные 12,06 и 11,39, показывают составы ГЦПВ с ЗУ и с ЦЕО соответственно. Бетон на основе ГЦПВ с МК и ГЦПВ с ЗУ позволит сохранить пассивирующее действие среды по отношению к стальной арматуре.

Анализ ГЦПВ суспензий по электропроводности продемонстрировал (рис. 6, б), что в составах ГЦПВ с МК и ЗУ до 7 сут твердения значения электропроводности увеличиваются, затем снижаются и на 28-е сут наблюдается небольшое увеличение, а далее идет снижение. Подобная зависимость в составе ГЦПВ с ЦЕО, но с меньшими значениями. Значения электропроводности во всех составах ГЦПВ с минеральными добавками ниже на одну-две единицы по сравнению с составами гипсоцементных композиций без МД.

Следует заметить, что на кондуктограмме (рис. 6, б) появление второго максимума в возрасте 28 сут на нисходящем участке графика можно объ-

яснить перекристаллизацией этtringита в моносульфатную форму [20, 21]. Другим объяснением может быть наличие защитных слоев вокруг зерен этtringита, которые при нарушении осмотического давления временно выделяют сульфат и другие ионы в окружающую среду.

Затем исследовали влияние бинарных минеральных добавок в составе ГЦПВ на изменение рН среды и их электропроводность при гидратации суспензии в течение 90 сут. Рассмотрены бинарные МД из смеси с МК с ЗУ; МК с ЦЕО и ЦЕО с ЗУ при их соотношении 2:1; 1:1 и 1:2. Результаты представлены на рис. 7.

Как видно из рис. 7, бинарные минеральные добавки оказывают своеобразное влияние на рН-показатель и электропроводность ГЦПВ суспензий. Наиболее высокое значение рН, равное 12,46, получено на ГЦПВ с бинарной добавкой из МК с ЗУ при их соотношении 2:1 на 90-е сут твердения (рис. 7, а), наименьшее значение рН зафиксировано в составе ГЦПВ с добавкой из ЦЕО с ЗУ при соотношении 2:1, которое составило 11,61 на 90-е сут (рис. 7, е).

Исследование суспензий ГЦПВ с бинарными добавками на электропроводность (рис. 7, а–с) показало, что интенсивное ее снижение (более чем на 3 мСм/см) зафиксировано в составах ГЦПВ с бинарной добавкой из ЦЕО и ЗУ при соотношении 1:2 (рис. 7, ф), а большое ее значение получено в составе ГЦПВ с бинарной добавкой из МК и ЦЕО при соотношении 2:1 (рис. 7, д).

В результате установлены два значимых времени твердения, в течение которых рН и электропроводность большинства исследуемых суспензий снижается — это 60 и 90 сут. Можно также отметить, что для образцов с большим содержанием МК снижение электропроводности начинается через 60 сут, тогда как для образцов с меньшим содержанием МК снижение электропроводности начинается раньше. Это объясняется тремя факторами: 1) уменьшением

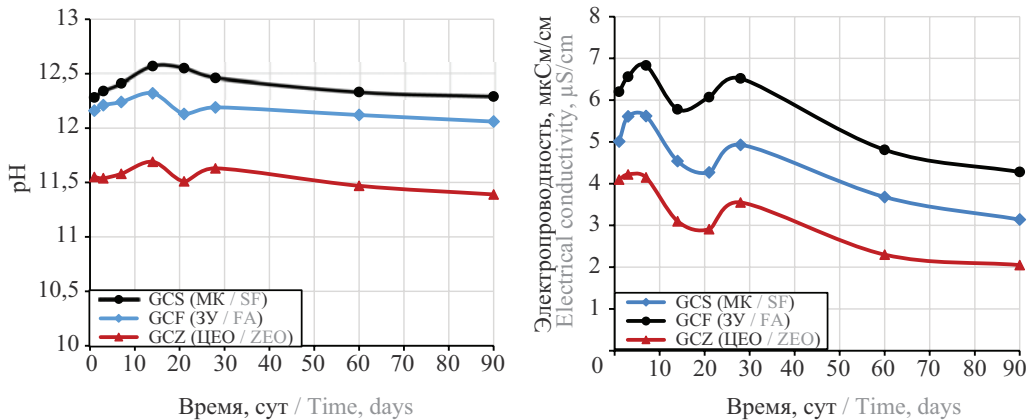


Рис. 6. Динамика изменения рН среды и электропроводности гидратирующихся ГЦПВ суспензий с монодобавками
Fig. 6. Dynamics of changes in the pH of the medium and electrical conductivity of hydrating GCPB suspension with mono-additives

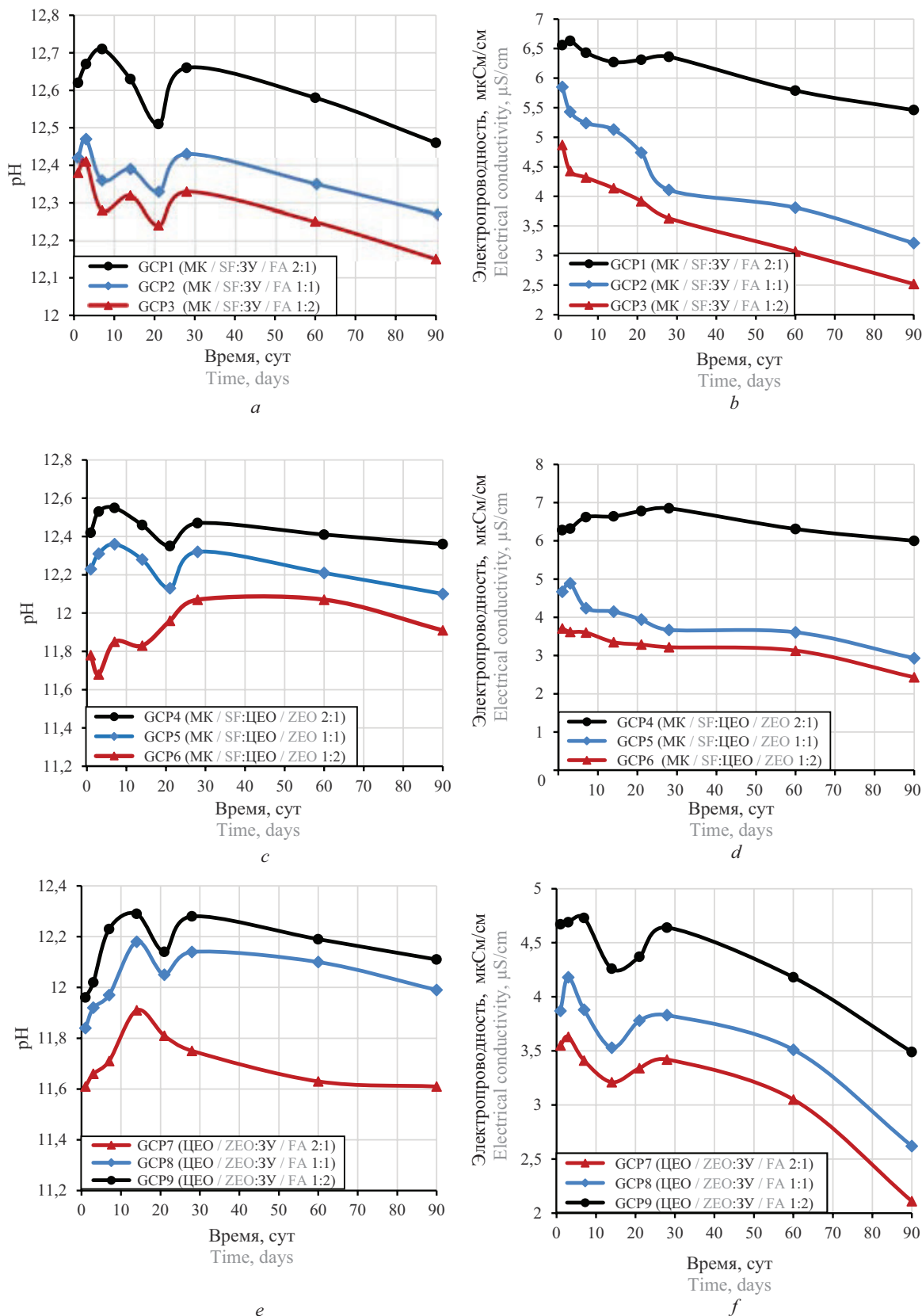


Рис. 7. Динамика изменения pH среды и электропроводности гидратирующихся ГЦПВ суспензий с бинарными добавками: *a, b* — МК с ЗУ при соотношении 1:2; 1:1; 2:1; *c, d* — МК с ЦЕО при соотношении 1:2; 1:1; 2:1; *e, f* — ЦЕО с ЗУ при соотношении 1:2; 1:1; 2:1

Fig. 7. Dynamics of changes in pH and electrical conductivity of hydrating GCPB suspension with binary additives: *a, b* — SF with FA at a ratio of 1:2; 1:1; 2:1; *c, d* — SF with ZEO at a ratio of 1:2; 1:1; 2:1; *e, f* — ZEO with FA at a ratio of 1:2; 1:1; 2:1

количества выщелачивающих ионов во время гидратации ПЦ по мере уменьшения его доли в смесях; 2) степенью потребления свободного Са(ОН)₂, высвобождаемый при гидратации ПЦ увеличивается по мере увеличения содержания МД; 3) взаимодействие минеральных добавок со свободным Са(ОН)₂ высвобождается в результате гидратации ПЦ, приводящей к образованию плохокристаллизованных гидратов силиката кальция.

На следующем этапе работы были изучены технологические и физико-механические свойства ГЦПВ при их модификации с индивидуальными и бинарными МД. Гипсоцементная композиция представлена для сравнения. Полученные результаты приведены в табл. 5 и на рис. 8, 9.

Как видно из данных табл. 5, исследуемые минеральные добавки несущественно изменяют водопотребность и сроки схватывания ГЦПВ смеси.

Как видно из табл. 5, с течением времени наблюдается рост плотности бетона изученных со-

ставов. Наибольшую плотность (1512 кг/см³) ГЦПВ камня имеет состав ГЦПВ с бинарной добавкой из МК с ЦЕО при их соотношении 2:1. Наибольшее снижение водопоглощения, равное 15,45 %, имеет состав ГЦПВ с бинарной добавкой из МК с ЦЕО при их соотношении 2:1, что на 1,7 раза меньше контрольного состава без минеральных добавок, его водопоглощение составило 25,6 %.

Как видно из рис. 8, 9, МД в зависимости от их вида и способа модификации оказывают существенное влияние на предел прочности при сжатии и коэффициент размягчения камней из ГЦПВ. Как видно из рис. 8, при введении в состав ГЦПВ мономинеральных добавок наибольший прирост прочности и коэффициент размягчения отмечается в составе ГЦПВ с добавкой МК и составляет на 28 сут 51 и 12 % соответственно по сравнению с составом без минеральных добавок.

Наилучшие физико-механические показатели ГЦПВ камня получены с бинарной минеральной

Табл. 5. Свойства ГЦПВ камня
Table 5. Properties of GCPB stone

Условное обозначение состава Conventional designation of composition	В/Т смеси W/S mixtures	Рас- плыв, мм Spread, mm	Сроки схватывания, мин:с / Setting time, min:sec		Средняя плотность, кг/м ³ , и коэффициент размягчения в возрасте, сут / Average density, kg/m ³ , and softening coefficient at age, days				Водо- поглощение образцов в возрасте 28 сут, % Water ab- sorption of specimens at the age of 28 days, %
			начало star	конец end	3	7	28	90	
G > C (конт) / (cont) (МД / MA = 0)	0,565	185 ± 5	8:30	13:30	1223 0,58	1254 0,58	1273 0,59	1277 0,56	25,62
GC	0,560		8:50	13:45	1373 0,64	1388 0,65	1485 0,66	1528 0,67	21,42
GCF	0,570		8:00	13:00	1323 0,62	1329 0,62	1347 0,64	1355 0,65	23,07
GCZ	0,575		7:30	12:30	1190 0,6	1204 0,61	1226 0,62	1237 0,63	16,24
GCP1	0,582		8:20	13:35	1314 0,65	1365 0,66	1463 0,68	1512 0,71	21,45
GCP2	0,575		8:15	13:25	1291 0,63	1318 0,64	1340 0,66	1478 0,67	22,73
GCP3	0,584		8:10	13:20	1297 0,61	1315 0,62	1348 0,63	1436 0,64	23,26
GCP4	0,580		8:00	13:15	1381 0,67	1309 0,68	1312 0,69	1396 0,73	15,45
GCP5	0,585		7:45	13:00	1268 0,64	1274 0,66	1311 0,67	1374 0,69	16,69
GCP6	0,595		7:25	12:50	1241 0,61	1275 0,63	1282 0,63	1287 0,65	16,17
GCP7	0,595		7:00	12:00	1230 0,6	1264 0,62	1288 0,62	1293 0,61	19,81
GCP8	0,600		7:40	12:30	1272 0,61	1278 0,61	1311 0,62	1321 0,62	20,63
GCP9	0,610		7:15	12:10	1284 0,61	1297 0,62	1326 0,63	1344 0,63	22,36

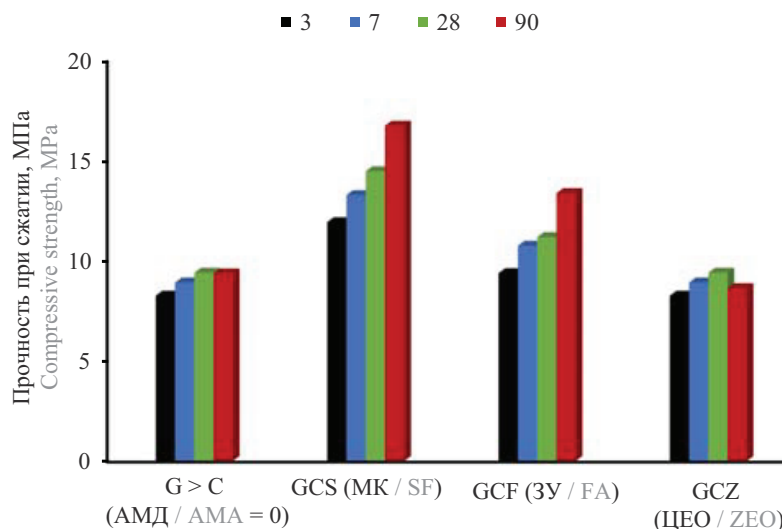


Рис. 8. Кинетика прочности при сжатии ГЦПВ камня с монодобавками
Fig. 8. Kinetics of compressive strength of GCPB stone with mono-additives

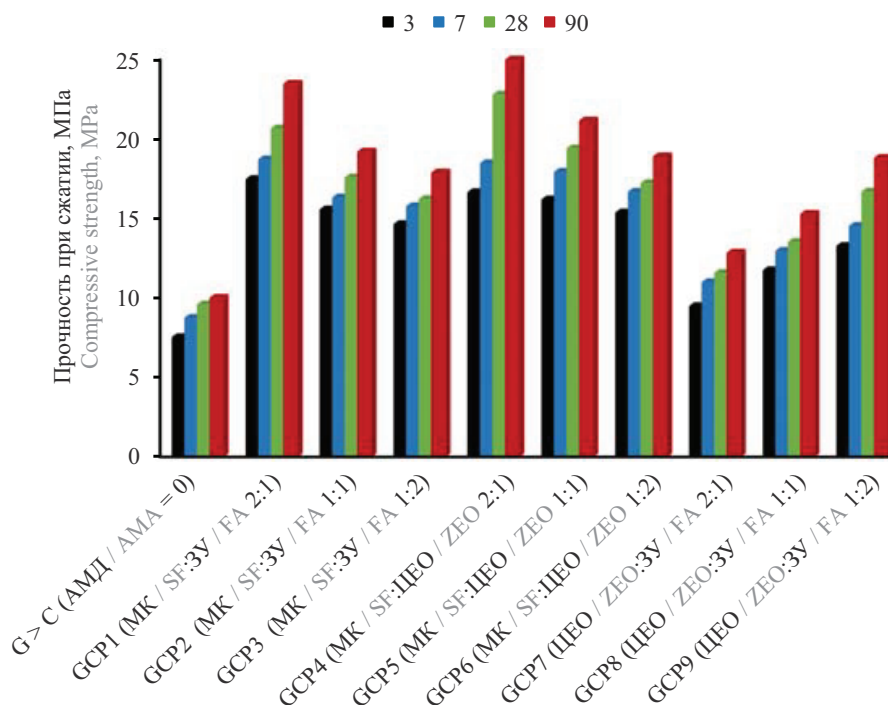


Рис. 9. Кинетика прочности при сжатии ГЦПВ камня с бинарными добавками
Fig. 9. Kinetics of compressive strength of GCPB stone with binary additives

добавкой, состоящей из МК:ЦЕО = 2:1 (рис. 9). При этом прочность и коэффициент размягчения ГЦПВ камня в 28-суточном возрасте составляют 23 МПа и 0,69 соответственно, а на 90-е сутки твердения возрастают до 25 МПа и 0,73 соответственно. Полученные сведения по электрохимическим свойствам (рН и электропроводность), а также по физико-механическим показателям (прочность на сжатие и коэффициент размягчения) дают возможность заявить о достаточной долговечности ГЦПВ для конструкционных бетонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

- установлено, что наибольшее значение рН среды ГЦПВ камня, равное 12,45, имеет состав с бинарной АМД из микрокремнезема и цеолита при соотношении 2:1, а с монодобавкой цеолита — 11,45 и оно наименьшее;
- изменения электропроводности суспензий ГЦПВ с АМД в течение 90 сут свидетельствуют о том, что МК способствует растворению минералов цемен-

та и переходу ионов в раствор, а ЦЕО замедляет этот процесс. Полученные данные необходимы при проектировании составов ГЦПВ бетонов и выборе эффективных водоредуцирующих добавок для матрицы ГЦПВ;

- наилучшие физико-механические показатели ГЦПВ получены с бинарной АМД, состоящей из микрокремнезема и цеолита при соотношении 2:1. Прочность ГЦПВ камня в 28-суточном возрасте составляет

23 МПа и возрастает до 25 МПа на 90-е сутки твердения;

- получен состав ГЦПВ, который может быть использован для конструкционного быстротвердеющего бетона, включающего 60 % гипсового вяжущего марки Г-5, 25 % портландцемента ЦЕМ I 42,5Н, комплексную активную минеральную добавку на основе природного цеолита Йеменского месторождения и микрокремнезема МК-85 при соотношении 2:1 по массе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шахов С.А. Влияние механоакустической активации волластонита на структуру и прочность цементного камня // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 4 (70). С. 8–18. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.1. EDN BKAQWL.

2. 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.

3. Вдовин Е.А., Буланов П.Е., Строганов В.Ф. Проектирование дорожных одежд со слоями из модифицированных кремнийорганическими соединениями цементогрунтов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 1 (67). С. 207–216. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.20. EDN ZABBNC.

4. Морозова Н.Н., Гуляков Е.Г. Свойства бетона на цеолитсодержащем вяжущем // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 2 (64). С. 27–39. DOI: 10.52409/20731523_2023_2_27. EDN LCQWVC.

5. Гиззатуллин А.Р., Морозова Н.Н., Нестерова К.О. Функционализированные наполнители для применения в цементных бетонах // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. 2023. № 1 (11). С. 47–57. EDN CBGPNV.

6. Хозин В.Г. Перспективы развития отрасли строительных материалов в свете использования вторичных ресурсов // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. 2023. № 1 (11). С. 22–29. EDN NEVNVS.

7. Морозова Н.Н., Закиров К.И. Сравнительная эффективность замедлителей схватывания гипсоцементно-пуццоланового бетона для 3D-печати // Решения современных проблем материаловедения и технологий в строительстве. ВладСтройТех 2024 : мат. I Междунар. конф. молодых ученых. 2024. С. 143–149. EDN OTOSPD.

8. Рахимов Р.З., Мухаметрахимов Р.Х., Зиганшина Л.В. Совершенствование аддитивных техно-

логий малоэтажного жилищного строительства // Жилищное строительство. 2024. № 8. С. 11–19. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-8-11-19. EDN IUNORV.

9. Мухаметрахимов Р.Х. Влияние пластифицирующих добавок на основе поверхностно-активных натриевых солей на свойства бетонов, применяемых в технологии 3D-печати // Полимеры в строительстве : научный интернет-журнал. 2022. № 1 (10). С. 47–61. EDN ZIMNSF.

10. Ферронская А.В. Долговечность конструкций из бетона и железобетона : учебное пособие. М. : Изд-во АСВ, 2006. 335 с. EDN QNMOKT.

11. Deschner F., Winnefeld F., Lothenbach B., Seufert S., Schwesig P., Dittich S. et al. Hydration of Portland cement with high replacement by siliceous fly ash // Cement and Concrete Research. 2012. Vol. 42. Issue 10. Pp. 1389–1400. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.06.009

12. Liu X., Niu D., Li X., Lv Y., Fu Q. Pore Solution pH for the Corrosion Initiation of Rebars Embedded in Concrete under a Long-Term Natural Carbonation Reaction // Applied Sciences. 2018. Vol. 8. Issue 1. P. 128. DOI: 10.3390/app8010128

13. Изотов В.С. Защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре как функция структуры цементного композита // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2006. № 1 (5). С. 23–27. EDN KBBJUN.

14. Hsu T., Slate F., Winter G. Microcracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-Strain Curve // ACI Journal Proceedings. 1963. Vol. 60. Issue 2. DOI: 10.14359/7852

15. Степанова В.Ф., Спивак Н.А., Королева Е.Н. Влияние степени коррозионного поражения арматуры на совместную работу с бетоном // Вестник НИЦ Строительство. 2024. № 1 (40). С. 105–116. DOI: 10.37538/2224-9494-2024-1(40)-105-116. EDN ORPAWU.

16. Клименко В.Г., Володченко А.Н. Кинетика гидратации и гидролиза различных форм сульфата кальция // Современные проблемы строительного материаловедения : мат. Междунар. науч.-техн. конф. Четвертые академические чтения РААСН. 1998. С. 53–54.

17. Аунг Ч.Н., Потапова Е.Н. Влияние вида пуццолановой добавки на состав и свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // *Успехи в химии и химической технологии*. 2022. Т. 36. № 3 (252). С. 7–9. EDN BXMIEA.

18. Халиуллин М.И., Гильманишина А.И. Влияние вида и механоактивации минеральных наполнителей на свойства композиционных гипсовых вяжущих. М. : Издательство МИСИ – МГСУ, 2021. С. 148–155.

19. Кайс Х.А., Морозова Н.Н. О возможности изготовления строительных изделий на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего в Республике Йемен // *Решения современных проблем материаловедения и технологий в строительстве*. ВладСтрой-

Тех 2024 : мат. I Междунар. конф. молодых ученых. 2024. С. 238–243. EDN ALTVDG.

20. Tashima M.M., Soriano L., Monzó J., Borrachero M.V., Akasaki J.L., Payá J. New method to assess the pozzolanic reactivity of mineral admixtures by means of pH and electrical conductivity measurements in lime:pozzolan suspensions // *Materiales de Construcción*. 2014. Vol. 64. Issue 316. P. e032. DOI: 10.3989/mc.2014.00914

21. Sinthaworn S., Nimityongskul P. Effects of temperature and alkaline solution on electrical conductivity measurements of pozzolanic activity // *Cement and Concrete Composites*. 2011. Vol. 33. Issue 5. Pp. 622–627. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.02.012

Поступила в редакцию 4 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 23 июля 2025 г.

Одобрена для публикации 23 июля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Хамза Абдулмалек Кайс — преподаватель-исследователь; Университет Саны; 13064, г. Сана, Йеменская Республика; SPIN-код: 9386-8763, РИНЦ ID: 868818, ORCID: 0009-0000-2805-7760; hamza.qais@mail.ru;

Нина Николаевна Морозова — кандидат технических наук, доцент; Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; ORCID: 0000-0002-7867-4203; ninamor@mail.ru.

Вклад авторов:

Кайс Х.А. — концепция исследования, написание статьи, сбор материала, обработка материала.

Морозова Н.Н. — научное руководство, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Shakhov S.A. Effect of mechanoacoustic activation of wollastonite on the structure and strength of cement stone. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2024; 4(70):8-18. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.1. EDN BKAWQL. (rus.).

2. Smirnov D.S., Mavliev L.F., Khuziakhmetova 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.).

3. Vdovin E.A., Bulanov P.E., Stroganov V.F. Design of road pavements with layers of soil-cement modified with organosilicon. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2024; 1(67):207-216. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.20. EDN ZABBNC. (rus.).

4. Morozova N.N., Gulyakov E.G. Properties of concrete based on zeolite-containing binder. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 2(64):27-39. DOI: 10.52409/20731523_2023_2_27. EDN LCQWVC. (rus.).

5. Gizzatullin A.R., Morozova N.N., Nesterova K.O. Functionalized fillers for use in cement con-

cretes. *Polymers in Construction: Scientific Online Journal*. 2023; 1(11):47-57. EDN CBGPNV. (rus.).

6. Khozin V.G. Prospects for the development of the building materials industry in the light of the use of secondary resources. *Polymers in Construction: Scientific Online Journal*. 2023; 1(11):22-29. EDN NEVNVS. (rus.).

7. Morozova N.N., Zakirov K.I. Comparative effectiveness of setting retarders of gypsum cement-pozzolan concrete for 3D printing. Solutions to modern problems of materials science and technology in construction. *VladStroyTech 2024 : Proceedings of the 1st International Conference of Young Scientists*. 2024; 143-149. EDN OTOCPD. (rus.).

8. Rakhimov R.Z., Mukhametrakhimov R.K., Ziganshina L.V. Improving additive manufacturing for housing construction. *Housing Construction*. 2024; 8:11-19. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-8-11-19. EDN IUNORV. (rus.).

9. Mukhametrakhimov R.Kh. Influence of plasticizing additives based on surface-active sodium salt on the properties of concrete used in 3D printing technology. *Polymers in Construction: Scientific Online Journal*. 2022; 1(10):47-61. EDN ZIMNSF. (rus.).

10. Ferronskaya A.V. *Durability of structures made of concrete and reinforced concrete : tutorial*. Moscow,

ASV Publishing House, 2006; 335. EDN QNMOKT. (rus.).

11. Deschner F., Winnefeld F., Lothenbach B., Seufert S., Schwesig P., Ditttrich S. et al. Hydration of Portland cement with high replacement by siliceous fly ash. *Cement and Concrete Research*. 2012; 42(10): 1389-1400. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.06.009

12. Liu X., Niu D., Li X., Lv Y., Fu Q. Pore Solution pH for the Corrosion Initiation of Rebars Embedded in Concrete under a Long-Term Natural Carbonation Reaction. *Applied Sciences*. 2018; 8(1):128. DOI: 10.3390/app8010128

13. Izotov V.S. Protective properties of concrete in relation to steel reinforcement as a function of the structure of the cement composite. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2006; 1(5):23-27. EDN KBBJUN. (rus.).

14. Hsu T., Slate F., Winter G. Microcracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-Strain Curve. *ACI Journal Proceedings*. 1963; 60(2). DOI: 10.14359/7852

15. Stepanova V.F., Spivak N.A., Koroleva E.N. Effect of the degree of corrosion damage in reinforcing bars on composite action with concrete. *Bulletin of the Scientific Research Center of Construction*. 2024; 1(40):105-116. DOI: 10.37538/2224-9494-2024-1(40)-105-116. EDN ORPAWU. (rus.).

16. Klimenko V.G., Volodchenko A.N. Kinetics of hydration and hydrolysis of various forms of calcium sulfate. Modern problems of construction materials science : Proceedings of the Int. scientific and technical

conference. *Fourth academic readings of RAASN*. 1998; 53-54. (rus.).

17. Aung K.N., Potapova E.N. Influence of the type of pozzolan additive on the composition and properties of gypsum-cement-pozzolan binder. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2022; 36(3):(252):7-9. EDN BXMIEA. (rus.).

18. Khaliullin M.I., Gilmanshina A.I. *Influence of the type and mechanical activation of mineral fillers on the properties of composite gypsum binders*. Moscow, Publishing House of MISI – MGSU, 2021; 148-155. (rus.).

19. Qais H.A., Morozova N.N. On the possibility of manufacturing construction products based on gypsum-cement-pozzolan binder in the republic of Yemen. Solutions to modern problems of materials science and technology in construction. *VladStroyTech 2024 : Proceedings of the 1st International Conference of Young Scientists*. 2024; 238-243. EDN ALTVDG. (rus.).

20. Tashima M.M., Soriano L., Monzó J., Borrachero M.V., Akasaki J.L., Payá J. New method to assess the pozzolanic reactivity of mineral admixtures by means of pH and electrical conductivity measurements in lime:pozzolan suspensions. *Materiales de Construcción*. 2014; 64(316):e032. DOI: 10.3989/mc.2014.00914

21. Sinthaworn S., Nimityongskul P. Effects of temperature and alkaline solution on electrical conductivity measurements of pozzolanic activity. *Cement and Concrete Composites*. 2011; 33(5):622-627. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.02.012

Received March 4, 2025.

Adopted in revised form on July 23, 2025.

Approved for publication on July 23, 2025.

B I O N O T E S : **Hamza A. Qais** — teacher-researcher; **Sana'a University**; Sana'a, 13064, Republic of Yemen; SPIN-code: 9386-8763, ID RSCI: 868818, ORCID: 0009-0000-2805-7760; hamza.qais@mail.ru;

Nina N. Morozova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7867-4203; ninamor@mail.ru.

Contribution of the authors:

Hamza A. Qais — concept of research, article writing, research, illustrations.

Nina N. Morozova — scientific management, scientific text editing.

Authors report about the absence of conflict of interests.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691:666.952.1

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1343-1353

Сравнительный анализ способов оценки реологической эффективности комплексных модификаторов в цементных системах

Валерий Станиславович Лесовик, Даниил Александрович Толыпин,
Наталья Максимовна Толыпина

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);
г. Белгород, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. На практике в качестве показателей эффективности действия добавок-разжижителей используют стандартные технические характеристики (осадка конуса, диаметр расплыва смеси и др.), по которым сложно судить о реологических свойствах цементных систем. Исследование посвящено анализу соотносительности показателей подвижности с реологическими характеристиками и вопросу регулирования реологических показателей цементных смесей с учетом электроповерхностных явлений.

Материалы и методы. Использовали наполнители (кварц, мрамор) с различными электроповерхностными свойствами ($S_{уд} = 300$ и $600 \text{ м}^2/\text{кг}$); вяжущее: ЦЕМ I 42,5 Н ЗАО «Осколцемент»; пластифицирующие добавки: суперпластификатор Полипласт СП-1, гиперпластификатор Sunbo 2021. Реологические характеристики дисперсий определяли на ротационном вискозиметре Rheotest RN 4.1, подвижность — при помощи мини-конуса. Микроанализ поверхности проводили с использованием РЭМ TESCAN MIRA 3 LM. Удельную поверхность определяли на приборе ПСХ-10а, электрокинетический потенциал поверхности частиц — на оборудовании Zetasizer Nano ZS.

Результаты. Показано, что наибольший разжижающий эффект наблюдается в суспензиях, где преобладающий знак заряда поверхности частиц минеральных наполнителей противоположен знаку заряда функциональной группы анионных пластифицирующих добавок, и наоборот. Выявлено, что вид минерального наполнителя сильнее сказывается на показателях подвижности, чем на реологических характеристиках. Установлена взаимосвязь между пластической вязкостью и подвижностью (РК). На основе анализа полученных реологических данных и подвижности выявлены области течения цементных дисперсий.

Выводы. Применение тонкодисперсных порошков положительно влияет на текучесть цементных дисперсий, мраморный наполнитель более эффективен, чем кварцевый. В области умеренного разжижения дисперсий (РК = 60–170 мм) расплав конуса аутентичен реологическим показателям, а крайние области плохо идентифицируются. Практическое применение результатов исследований позволит повысить эффективность использования супер- и гиперпластификаторов и упростить оценку реологического режима течения дисперсий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цементные системы, минеральный наполнитель, пластификатор, предел текучести, пластическая вязкость, реологические свойства, расплав конуса

Благодарности. Работа выполнена в рамках реализации гранта Российского научного фонда (проект № 25-19-00866).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лесовик В.С., Толыпин Д.А., Толыпина Н.М. Сравнительный анализ способов оценки реологической эффективности комплексных модификаторов в цементных системах // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 9. С. 1343–1353. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1343-1353

Автор, ответственный за переписку: Даниил Александрович Толыпин, tolypin.daniil@yandex.ru.

Comparative analysis of methods for assessing the rheological efficiency of complex modifiers in cement systems

Valeriy S. Lesovik, Daniil A. Tolypin, Natalia M. Tolypina

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov);
Belgorod, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In practice, standard technical characteristics (such as cone slump, mixture spread diameter, etc.) are used as indicators of the efficiency of plasticizing additives. However, these characteristics make it difficult to judge the rheological properties of cement systems. This paper is devoted to analyzing the correlation between mobility indicators and rheological characteristics, as well as the regulation of rheological parameters of cement mixtures considering electro-surface phenomena.

Materials and methods. Fine fillers (quartz, marble) with different electro-surface properties ($S_{sp} = 300$ and $600 \text{ m}^2/\text{kg}$) were used. The binder was CEM I 42.5 N produced by CJSC “Oskoltsement”; chemical additives included the superplasticizer

Polyplast SP-1 and the superplasticizer Sunbo 2021. Rheological characteristics of the dispersions were determined using a Rheotest RN 4.1 rotational viscometer, and mobility was assessed with a mini-cone. Surface microanalysis was conducted using a TESCAN MIRA 3 LM scanning electron microscope. Specific surface area was measured with a PSKh-10a device, and the electrokinetic potential of particle surfaces was measured using a Zetasizer Nano ZS.

Results. It was shown that the greatest thinning effect was observed in suspensions where the predominant surface charge of mineral filler particles was opposite to the charge of the functional group of anionic plasticizing additives, and vice versa. It was revealed that the type of mineral filler had a stronger impact on mobility indicators than on rheological characteristics. A correlation between plastic viscosity and mobility (spread diameter) was established. Based on the analysis of the obtained rheological data and mobility, flow regions of cement dispersions were identified.

Conclusions. The use of fine powders positively influences the flowability of cement dispersions, with marble filler being more effective than quartz. In the region of moderate dispersion thinning (spread diameter = 60–170 mm), the cone spread is consistent with the rheological properties of cement systems. Practical application of the research results presented in this paper will enhance the efficiency of superplasticizers and simplify the assessment of the rheological flow regime of dispersions.

KEYWORDS: cement systems, mineral filler, plasticizer, yield stress, plastic viscosity, rheological properties, cone spread

Acknowledgments. This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 25-19-00866).

FOR CITATION: Lesovik V.S., Tolypin D.A., Tolypina N.M. Comparative analysis of methods for assessing the rheological efficiency of complex modifiers in cement systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(9):1343-1353. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1343-1353 (rus.).

Corresponding author: Daniil A. Tolypin, tolypin.daniil@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Анионные поверхностно-активные вещества (ПАВ) адсорбируются на положительно заряженных активных центрах гидратных соединений, что сопровождается разрушением флоккул с высвобождением иммобилизированной воды и увеличением подвижности цементного теста. У применяемых в настоящее время анионоактивных пластифицирующих добавок знак заряда функциональной группы и активных центров на поверхности традиционных наполнителей и заполнителей (кварц, гранит, диорит, кварцитопесчаник и др.) совпадают. Так как анионные ПАВ не адсорбируются на поверхностях с преимущественно отрицательно заряженными активными центрами, то наполнители и заполнители бетонов из кислых горных пород являются инертными компонентами с точки зрения разжижения [1, 2]. В этой связи бетонные смеси с низким содержанием вяжущего плохо пластифицируются современными анионными добавками, что может привести к большой технологическим осложнениям и быть возможной причиной плохой удобоукладываемости [3–5]. Для того чтобы вовлечь не только вяжущее, но и наполнитель бетонной смеси в процесс взаимодействия с функциональной группой добавок-разжижителей, необходимо, чтобы поверхностные заряды дисперсных минеральных компонентов бетонной смеси и функциональных групп пластифицирующих добавок были противоположны по знаку [6–8]. Более предпочтительными будут минеральные наполнители, которые имеют преимущественно положительный знак заряда поверхностных активных центров. К ним относятся минеральные модификаторы на основе карбонатных горных пород: известняки, доломиты, мраморы.

На практике в качестве показателей эффективности действия добавок-разжижителей используют стандартные технические характеристики, такие

как осадка конуса, диаметр расплыва смеси и др. Однако, используя эти способы, сложно судить о реологических свойствах цементных систем, которые отражают механическое поведение под внешними воздействиями (предельное напряжение сдвига, эффективная вязкость) [9–12]. Отличительное свойство — трансформация реологических показателей с ростом или уменьшением скорости сдвига. Применяя реологические показатели, характеризующие структурно-механические свойства цементных систем, можно проводить аутентичный выбор химических добавок-модификаторов, обеспечивающих стабильность структуры смесей при транспортировании и одновременно требуемую текучесть при формировании [13–17]. Вопросу о взаимосвязи данных подвижности и реологических показателей сегодня не уделяется должного внимания, и в технической литературе такого рода сведения достаточно ограничены [2].

Наиболее эффективным способом регулирования реологических свойств смесей на цементной основе служит применение супер- и гиперпластификаторов, эффективно снижающих предел текучести и вязкость до минимального уровня, вплоть до самоуплотнения и исключения необходимости механических воздействий [6, 9–11]. Несмотря на то что дисперсные минеральные добавки все шире применяются в качестве компонентов строительных материалов [9, 18–20], вопрос регулирования реологических характеристик цементных смесей при помощи комплексного действия минеральных и органических добавок с учетом электроповерхностных явлений исследован недостаточно. Работа посвящена восполнению пробелов в области оценки реологических показателей модифицированных цементных систем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Тонкодисперсные наполнители с различными электроповерхностными свойствами получали

помолом в лабораторной мельнице до удельной поверхности $S_{уд} = 300$ и $600 \text{ м}^2/\text{кг}$. Использовали кварцевый песок ООО «Пулмаркет» ($\text{SiO}_2 = 95 \%$, $S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$) и ООО «Формматериалы» ($\text{SiO}_2 = 99,3 \%$, $S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$), мрамор Еленинского месторождения ($S_{уд} = 300$ и $600 \text{ м}^2/\text{кг}$). Преобладающий заряд поверхности кварцевого песка — $31,6 \text{ мВ}$ (ООО «Пулмаркет», $S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$) и $38,9 \text{ мВ}$ (ООО «Формматериалы», $S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$), мрамора + $19,3 \text{ мВ}$. Присутствуют незначительные количества активных центров противоположного знака у частиц всех составов. В качестве вяжущего использовали ЦЕМ I 42,5 Н ЗАО «Осколцемент» ($\tau_{н.схв} = 230 \text{ мин}$; $\text{НГ} = 26 \%$, $\text{C}_3\text{S} = 61,6 \%$, $\text{C}_2\text{S} = 14,2 \%$, $\text{C}_3\text{A} = 6,8 \%$, $\text{C}_4\text{AF} = 3,7 \%$). Химические добавки: суперпластификатор (СП) нафталинформальдегидного типа Полипласт СП-1 (ТУ 5870-005-58042865-05), гиперпластификатор (ГП) на поликарбоксилатной основе Sunbo 2021 (Suzhou Sunbo Chemical Building Materials Co., Ltd). Пластифицирующие добавки вводили с водой затворения в цементные дисперсии (ПЦ:наполнитель = 70:30).

Для исследований использовали усеченный мини-конус высотой 60 мм с диаметром нижнего отверстия 40 мм, верхнего — 20 мм. Контрольное значение распыла мини-конуса исследованных суспензий ($\text{В/Т} = 0,3$) без гипер- и суперпластификатора соответствовало 45 мм. При введении модификаторов-разжижителей СП-1 (0,4 %) и Sunbo 2021 (0,4 %) в дисперсии различного состава фик-

сировались изменения подвижности по диаметру распыла на гладкой стеклянной поверхности. Реологические характеристики цементных дисперсий изучали при помощи ротационного вискозиметра Rheotest RN 4.1. Микроанализ поверхности порошков с помощью картирования проводили с использованием растрового электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 LM. Удельную поверхность определяли на приборе ПСХ-10а (метод газопроницаемости), измерения электрокинетического потенциала поверхности частиц — на оборудовании Zetasizer Nano ZS.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения текучести дисперсий различного состава и оценки эффективности действия добавок-разжижителей использовали метод мини-конуса, широко применяемый отечественными и зарубежными специалистами. Мраморные дисперсии демонстрировали наибольшую способность разжижаться под воздействием анионоактивных супер- и гиперпластификатора (рис. 1, 2). Это обусловлено тем, что на поверхности частиц мрамора с преимущественно положительно заряженными активными центрами идет интенсивная адсорбция макромолекул добавок пластифицирующего действия за счет электростатического взаимодействия с отрицательно заряженными функциональными группами, благодаря чему наблюдается высокий разжижающий эффект. С увеличением удельной поверхности

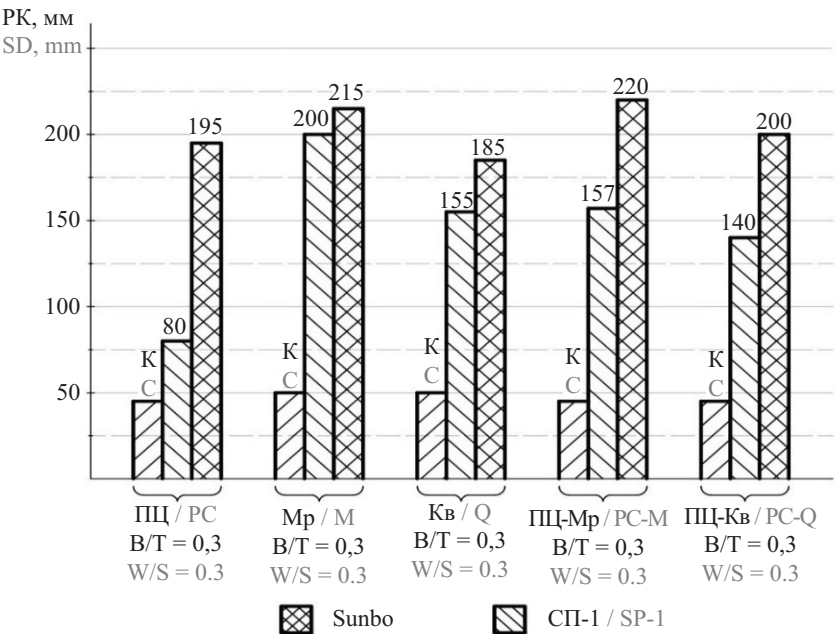


Рис. 1. Сравнительная подвижность (ПК) дисперсий различного состава с добавками разжижителями Sunbo (0,4 %) и СП-1 (0,4 %): ПЦ — портландцемент; Мр — мрамор ($S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$); Кв — кварц ($S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$); ПЦ-Мр — цементно-мраморная дисперсия 70:30; ПЦ-Кв — цементно-кварцевая дисперсия 70:30; К — контрольный состав без СП

Fig. 1. Comparative mobility (spread diameter) of dispersions of different compositions with thinning additives Sunbo (0,4 %) and SP-1 (0,4 %): PC — Portland cement; M — marble ($S_{sp} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$); Q — quartz ($S_{sp} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$); PC-M — cement-marble dispersion 70:30; PC-Q — cement-quartz dispersion 70:30; C — control composition without plasticizer

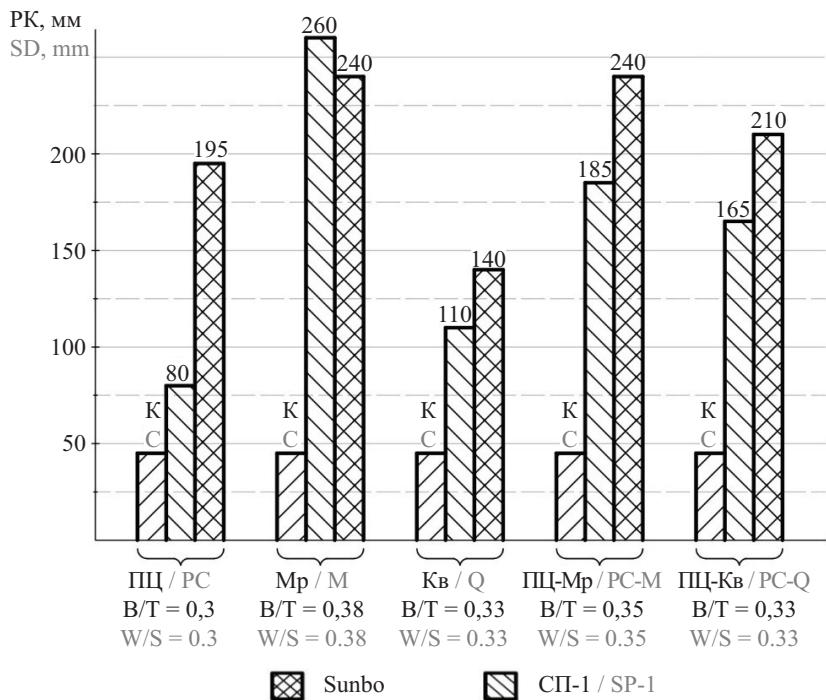


Рис. 2. Сравнительная подвижность (PK) дисперсий различного состава с добавками разжижителями Sunbo (0,4 %) и СП-1 (0,4 %): ПЦ — портландцемент; Мр — мрамор ($S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$); Кв — кварц ($S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$); ПЦ-Мр — цементно-мраморная дисперсия 70:30; ПЦ-Кв — цементно-кварцевая дисперсия 70:30; К — контрольный состав без СП

Fig. 2. Comparative mobility (spread diameter) of dispersions of different compositions with thinning additives Sunbo (0.4 %) and SP-1 (0.4 %): PC — Portland cement; M — marble ($S_{sp} = 600 \text{ m}^2/\text{kg}$); Q — quartz ($S_{sp} = 600 \text{ m}^2/\text{kg}$); PC-M — cement-marble dispersion 70:30; PC-Q — cement-quartz dispersion 70:30; C — control composition without plasticizer

мрамора от 300 до 600 $\text{м}^2/\text{кг}$ подвижность дисперсии увеличилась от 200 до 260 мм с СП-1 (0,4 %) и от 215 до 240 с Sunbo (0,4 %).

Кварцевые дисперсии во всех случаях разжижались слабее, уступая мраморным. Более интенсивное разжижение наблюдалось у кварцевой суспензии с удельной поверхностью кварца 300 $\text{м}^2/\text{кг}$, чем с $S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$. Причина такого расхождения заключалась в том, что кварцевый наполнитель с $S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$, полученный измельчением природного кварцевого песка, содержал образованные в процессе литогенеза примеси в виде дисперсных пленок соединений алюминия, которые являются источником положительно заряженных центров (рис. 3). В результате происходит повышение адсорбции макромолекул анионоактивных гипер- и суперпластификатора на поверхности частиц с положительно заряженными активными центрами и разжижение усиливается.

В случае, когда использовался тонкодисперсный кварц с высокой степенью чистоты поверхности ($S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$), наблюдалось слабое разжижение кварцевых суспензий (рис. 2). Это обусловлено тем, что у чистого кварца более высокий электроотрицательный заряд поверхности, в результате адсорбция анионоактивных заряженных ионов незначительна, а разжижающая способность супер- и гипер-пластификатора резко снижается. Однако, несмотря на преобладающее

количество отрицательно заряженных центров на поверхности кварцевых частиц, также образуется и некоторое количество положительно заряженных центров, число которых возрастает по мере измельчения кварцевого порошка, что обеспечивает несущественную адсорбцию макромолекул пластифицирующих добавок на частицах кварца и слабое разжижение.

У смешанных цементно-мраморных и цементно-кварцевых суспензий (70:30) разница по подвижности нивелируется. Электроповерхностные свойства наполнителей оказывают меньшее влияние на разжижение смешанных цементных дисперсий, чем чисто минеральных, так как сказывается преобладающее влияние гидроалюминатных частиц портландцемента, имеющих положительный заряд поверхности. При этом электроповерхностные свойства наполнителей в большой степени будут влиять на стабильность разжижающего действия во времени из-за возможных реакций гетерокоагуляции с заряженными частицами гидратных фаз. Следует отметить, что применение тонкодисперсных наполнителей, менее склонных к агрегированию, положительно влияет на подвижность цементного теста. У смешанных цементных дисперсий тенденция к флокуляции выражена слабее, чем в чистом цементном тесте, где сказывается сильное притяжение частиц силикатов к алюминатам, в том числе с проявлением химических связей. В этой связи смешан-

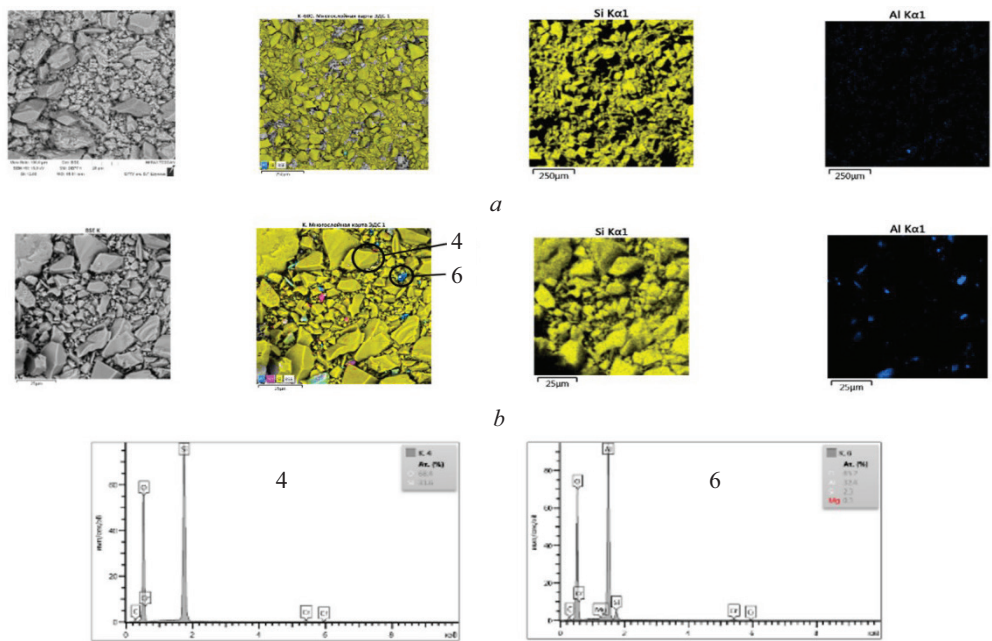


Рис. 3. Микроанализ поверхности частиц кварца с помощью картирования: *a* — $S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$; *b* — $S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$
Fig. 3. Surface microanalysis of quartz particles using mapping: *a* — $S_{sp} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$; *b* — $S_{sp} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$

ные цементно-мраморные и цементно-кварцевые дисперсии, модифицированные пластифицирующими добавками, сильнее разжижаются, чем чисто цементные. Применение мраморного наполнителя более эффективно, чем кварцевого при одинаковой степени измельчения.

Большое практическое значение имеет изучение вопроса о сопоставимости результатов измерения

расплава конуса с данными вискозиметрических исследований. Реологические показатели цементных дисперсий, модифицированных минеральными и пластифицирующими добавками, демонстрируют эффективное снижение пластической вязкости и напряжения сдвига (рис. 4), о чем свидетельствует снижение степени нелинейности реограмм и приближение структурного режима течения диспер-

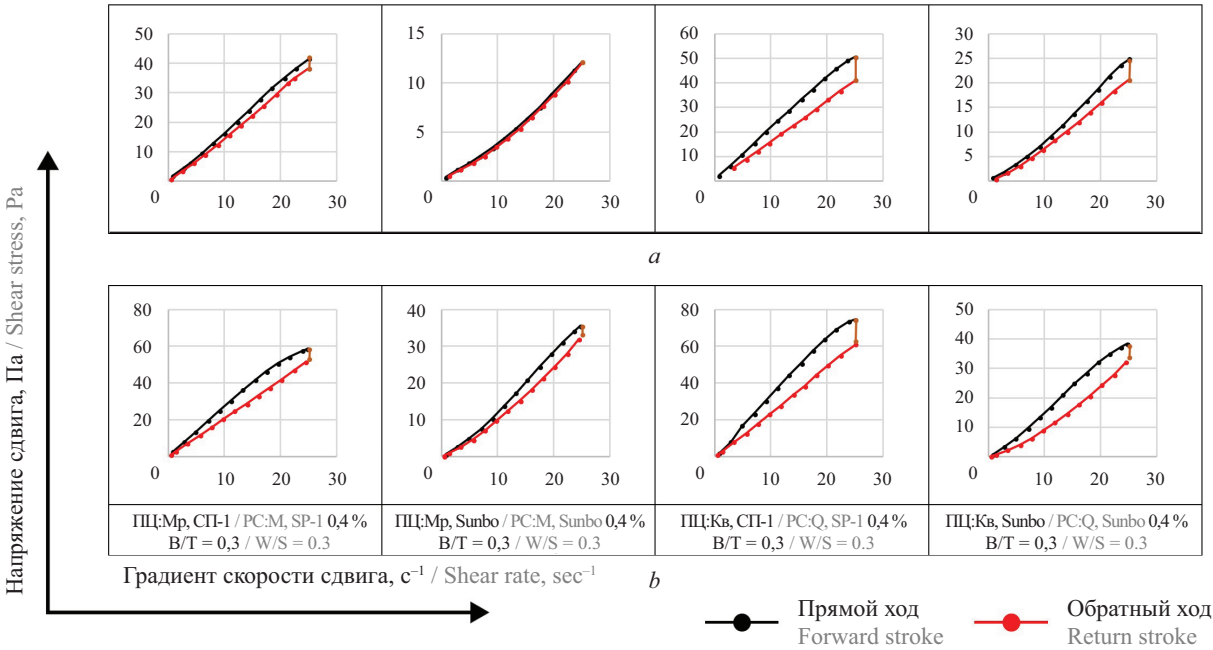


Рис. 4. Реограммы цементных дисперсий с минеральными и органическими модификаторами: *a* — $S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$; *b* — $S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$
Fig. 4. Rheograms of cement dispersions with mineral and organic modifiers: *a* — $S_{sp} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$; *b* — $S_{sp} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$

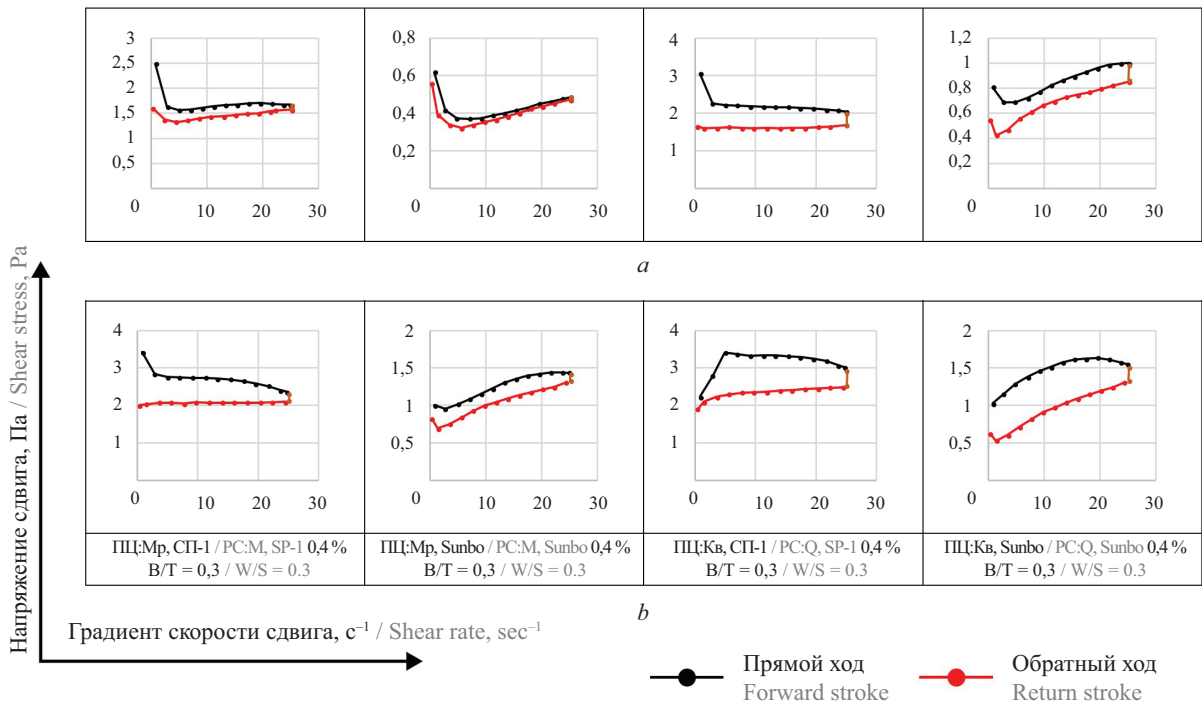


Рис. 5. Вязкость цементных дисперсий с минеральными и органическими модификаторами: $a — S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$; $b — S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$

Fig. 5. Viscosity of cement dispersions with mineral and organic modifiers: $a — S_{sp} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$; $b — S_{sp} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$

сий к ньютоновскому. Низкие значения пределов текучести смешанных цементных суспензий отражают наличие участков с упругой деформацией при очень малых интервалах напряжений сдвига. Цементно-мраморные дисперсии характеризуются более сильной нелинейностью реограмм при минимальных значениях предела текучести по сравнению с цементно-кварцевыми. Ввод гиперпластификатора Sunbo приводит к резкому снижению тиксотропии по сравнению с модификатором СП-1. Вязкость смешанных цементных дисперсий с СП-1 приблизительно в 2–3 раза больше, чем с Sunbo (рис. 5). Выделяется реограмма цементно-мраморной дисперсии ($S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$) с гиперпластификатором Sunbo, которая отражает проявление тиксотабильных свойств, когда происходит совпадение скоростей разрушения и восстановления структуры, при этом наблюдается совмещение экспериментальных точек на прямой и обратной ветвях реологической кривой (рис. 4). Остальные реограммы демонстрируют слабо выраженные тиксотропные свойства, сужение петли гистерезиса свидетельствует о приближении системы к тиксотабильности и усилении влияния коагуляционных связей.

Вязкость систем с поликарбоксилатной добавкой Sunbo менее чувствительна к виду применяемого минерального наполнителя, чем с суперпластификатором СП-1. Значения пластической вязкости смешанных цементных суспензий с добавкой суперпластификатора СП-1 незначительно снижаются с ростом скорости сдвига (рис. 5), а с гиперпла-

стификатором Sunbo слабо повышаются, проявляя дилатантные свойства. Характерно, что цементно-мраморная дисперсия с наибольшим распылом конуса (240 мм) отличается наименьшими значениями предельного напряжения сдвига — 0,45 Па и пластической вязкости 0,6 Па·с (рис. 2, 4, 5). При этом у цементно-кварцевой дисперсии с минимальной подвижностью (РК = 140 мм, СП-1) отмечается наибольшая вязкость — 3,1 Па·с.

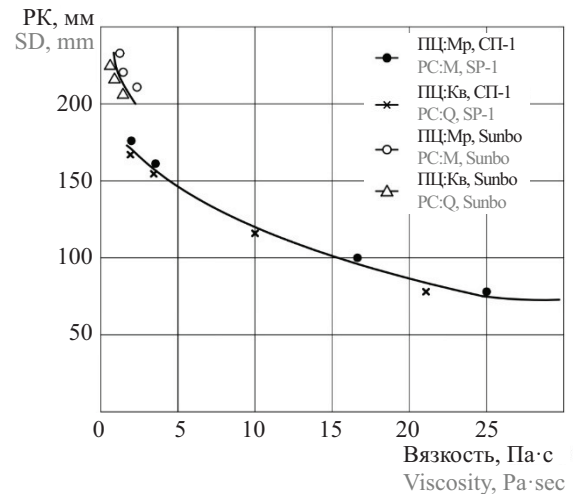


Рис. 6. Распыл мини-конуса цементных суспензий в зависимости от пластической вязкости

Fig. 6. Spread of the mini-cone of cement suspensions depending on plastic viscosity

Анализ и сопоставление реологических свойств смешанных дисперсий с их подвижностью позволили выявить определенную взаимосвязь между ними. На основе приведенных экспериментальных данных и опубликованных ранее авторами статьи установлено, что в области пластической вязкости смешанных цементных суспензий 2–25 Па·с наблюдается обратно пропорциональная зависимость между пластической вязкостью и распылом конуса (рис. 6). В области низких значений вязкости менее 1–2 Па·с зависимость подвижности (РК) от вязкости мало зависела от последней, а с повышением пластической вязкости более 25 Па·с распыл конуса перестает реагировать на ее изменения. Таким образом, определение текучести дисперсий по распылу мини-конуса не дает полной картины разжижения. Взаимосвязь между пластической вязкостью и расте-

каемостью при использовании мини-конуса хорошо коррелируется только в области умеренного разжижения, а крайние области плохо идентифицируются. Сопоставление реологических данных и подвижности позволило идентифицировать реологические области течения с кривыми подвижности (рис. 7). Область вязкопластичного (пластичного) течения дисперсий находится в диапазоне значений подвижности (РК = 40–150 мм) и вязкости 10–25 Па·с. Область линейного течения наблюдается при значениях РК > 155 мм и вязкости менее 5–7 Па·с (рис. 7, b). При вводе гиперпластификатора Sunbo (0,2–0,6 %) пластическая вязкость падает практически в 95–230 раз, а при вводе СП-1 (0,4–0,6 %) в 58–100 раз и находится в пределах 0,86–3,44 Па·с. В этом случае течение идет с минимальной вязкостью и практически разрушенной структурой с элементами слабо-

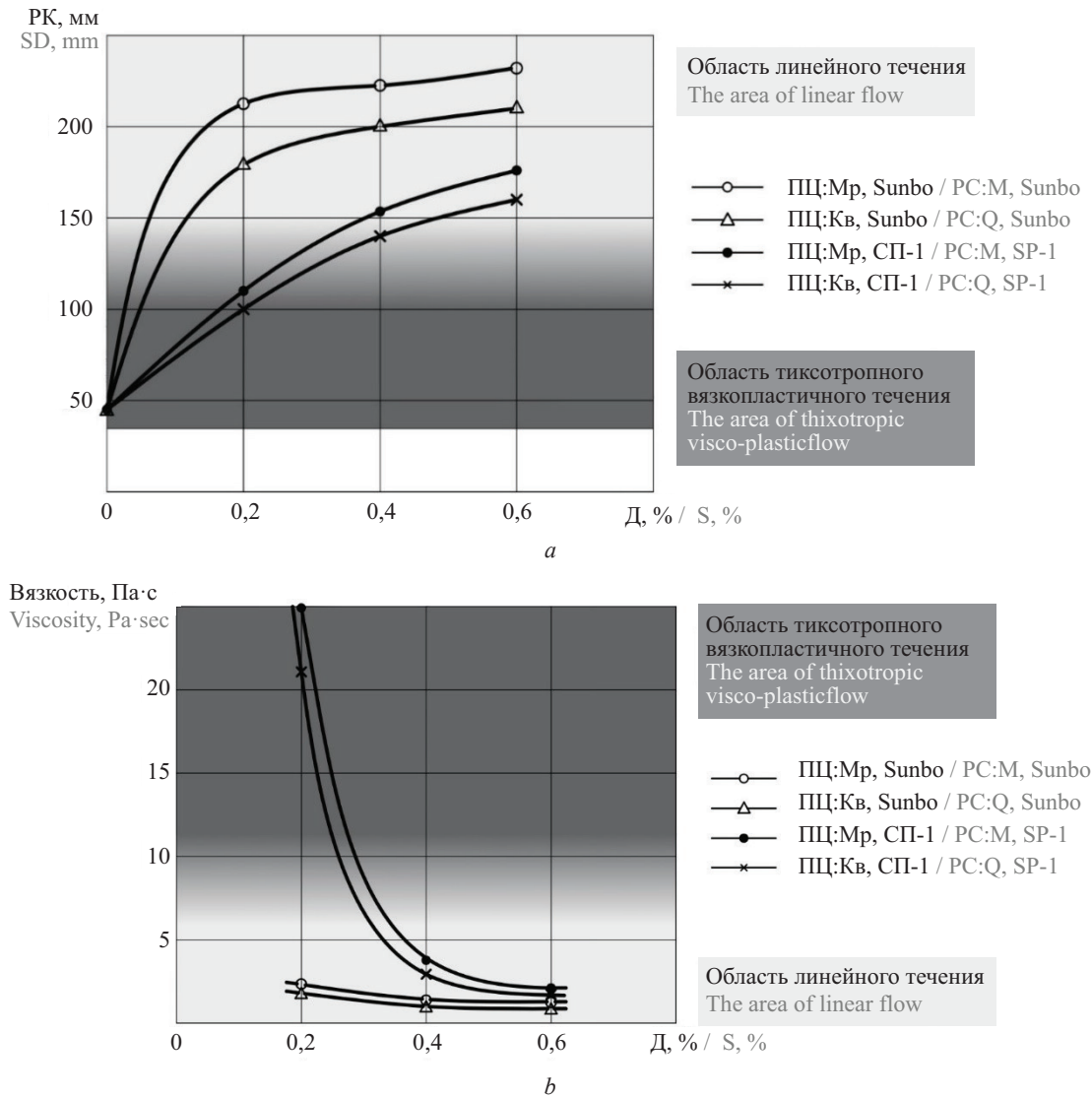


Рис. 7. Области течения цементных суспензий с добавками-разжижителями в зависимости от: *a* — подвижности (РК); *b* — пластической вязкости

Fig. 7. Flow regions of cement suspensions with thinning additives depending on: *a* — mobility (spread diameter); *b* — plastic viscosity

выраженного тиксотропного течения, это область линейного течения. При значениях пластической вязкости около 10 Па·с и выше наблюдается область вязкопластичного течения. Дальнейшие реологические исследования подтвердили достоверность установленных областей течения. Это позволяет, используя более доступный метод определения подвижности при помощи мини-конуса, косвенно судить о реологических характеристиках цементных дисперсий с пластифицирующими добавками, измерение которых более трудоемко и требует специального сложного оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что эффективность разжижения смешанных цементных суспензий при помощи анион-активных супер- и гиперпластификаторов зависит от электроповерхностных свойств частиц минеральных модификаторов. Наибольший разжижающий эффект наблюдается в суспензиях на основе минеральных наполнителей с положительно заряженными частицами. Если преобладающий знак заряда поверхности частиц порошка отрицательный, т.е. совпадает со знаком заряда функциональной группы суперпластификатора, это приводит к снижению разжижения. Применение тонкодисперсных порошков положительно влияет на текучесть цементных дисперсий, мраморный наполнитель более эффективен, чем кварцевый. Вид минерального наполнителя сильнее сказывается на показателях подвижности, чем на реологических характеристиках. Это обусловлено тем, что в первом случае дефлокуляция обеспечивается действием только добавок-разжижителей, а при определении реологических показателей цементная дисперсия подвергается также и механическому воздействию, что вызывает интенсивное разрушение флоккул.

Дисперсии, полученные помолком обычного кварцевого песка, могут эффективно разжижаться несмотря на преобладающее количество отрицательно заряженных центров на поверхности кварца. Причиной является наличие примесей в виде пленок оксидов и гидроксидов алюминия (железа) в квар-

цевых песках, вызывающих смещение дзета-потенциала в положительную область. Дисперсии тонкодисперсного чистого кварца без примесей слабо разжижаются, так как адсорбция анион-активных заряженных ионов на отрицательно заряженных активных центрах частиц кварца происходит слабее, в результате разжижающая способность анион-активных супер- и гиперпластификаторов падает.

Взаимосвязь между пластической вязкостью и РК зависит от степени разжижения, которая связана с составом дисперсий и дозировками пластифицирующих добавок. В области умеренного разжижения дисперсий (РК = 60–170 мм) при небольших дозировках пластифицирующих добавок расплыв конуса аутентичен реологическим свойствам цементных систем. При более высоких показателях текучести с РК = 200–300 мм и более подвижность по расплыву мини-конуса слабее отражает реологические свойства дисперсных систем. При малом разжижении (РК < 60 мм) расплыв конуса и вязкость соотносятся неудовлетворительно. Таким образом, использовать показатель подвижности дисперсии по расплыву мини-конуса рационально для идентификации текучести суспензий с умеренной пластической вязкостью, но нецелесообразно при малой и высокой вязкости.

На основе анализа полученных реологических данных и подвижности установлены области течения цементных дисперсий. Область вязкопластичного (пластичного) течения дисперсий соответствует диапазону значений подвижности (РК = 40–150 мм), что соответствует вязкости 10–25 Па·с. При значениях подвижности РК > 155 мм течение идет с минимальной вязкостью (0,86–3,44 Па·с) и практически разрушенной структурой с элементами слабовыраженного тиксотропного течения — это область линейного течения. Установленная зависимость позволяет при помощи простого доступного метода определения подвижности с использованием мини-конуса получать косвенные сведения о реологических характеристиках цементных дисперсий с пластифицирующими добавками, измерение которых требует специального сложного оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Толыпина Н.М., Толыпин Д.А. Влияние минеральных наполнителей на разжижение цементных суспензий с помощью ПАВ // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 9. С. 26–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-26-33. EDN ENFGLL.

2. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Хахалева Е.Н. Взаимосвязь между пластической вязкостью цементных систем и их реотехнологическими характеристиками // Вестник Сибирского государствен-

ного автомобильно-дорожного университета. 2018. Т. 15. № 2 (60). С. 276–282. EDN XSDGCL.

3. Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Сальникова А.С., Казлитина О.В. К вопросу повышения эффективности высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 1 (46). С. 20–27. EDN DIRJUN.

4. Леденев А.А., Козодаев С.П., Перцев В.Т., Баранов Е.В., Загоруйко Т.В., Внуков Д.Н. Механизмы действия различных видов органоминеральных до-

бавок в цементной системе // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021. № 9. С. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-9-8-19. EDN UFSCDT.

5. Ghosal M., Chakraborty A.K. Superplasticizer compatibility with cement properties — a study // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 56. Pp. 568–573. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.386

6. Шахова Л.Д. К вопросу совместимости цементов с пластифицирующими добавками // Цемент и его применение. 2024. № 4. С. 48–55. EDN DTZPCT.

7. Ortiz-Álvarez N., Lizarazo-Marriaga J., Brandão P.F.B., Santos-Panqueva Y., Carrillo J. Rheological properties of cement-based materials using a bio-polymer viscosity modifying admixture (BVMA) under different dispersion conditions // Cement and Concrete Composites. 2021. Vol. 124. P. 104224. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104224

8. Du J., Meng W., Khayat K.H., Bao Y., Guo P., Lyu Z. et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC) // Composites Part B: Engineering. 2021. Vol. 224. P. 109220. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109220

9. Перцев В.Т., Леденев А.А. Разработка эффективных комплексных органоминеральных добавок для регулирования реологических свойств бетонных смесей : монография. Воронеж : ВГАСУ, 2012. 135 с. EDN QNQCST.

10. Chen J., Qiao M., Gao N., Wu J., Shan G., Zhu B. et al. Acrylate based post-acting polymers as novel viscosity modifying admixtures for concrete // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 312. P. 125414. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125414

11. Ferraz D.F., Martho A.C.R., Burns E.G., de Oliveira Romano R.C., Pileggi R.G. Effect of prehydration of Portland cement on the superplasticizer consumption and the impact on the rheological properties and chemical reaction // Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. 2023. Vol. 16. Issue 2. DOI: 10.1590/s1983-41952023000200010

12. Zhang Q., Chen J., Zhu J., Yang Y., Zhou D., Wang T. et al. Advances in organic rheology-modifiers (chemical admixtures) and their effects on the rheological properties of cement-based materials // Materi-

als. 2022. Vol. 15. Issue 24. P. 8730. DOI: 10.3390/ma15248730

13. Рахимбаев Ш.М., Логвиненко А.А. Реологические свойства материалов для строительства объектов транспортной инфраструктуры // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 5 (665). С. 26–33. EDN SQTAGF.

14. Khayat K.H., Meng W., Vallurupalli K., Teng L. Rheological properties of ultra-high-performance concrete — an overview // Cement and Concrete Research. 2019. Vol. 124. P. 105828. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105828

15. Qiao M., Chen J., Gao N., Shan G., Wu J., Zhu B. et al. Effects of adsorption group and molecular weight of viscosity-modifying admixtures on the properties of cement paste // Journal of Materials in Civil Engineering. 2022. Vol. 34. Issue 7. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004296

16. Ji X., Pan T., Zhao W., Liu J., Sha J., Han F. Interaction of superplasticizers with C3A: Understanding the superplasticizer compatibility with cement // Journal of Materials in Civil Engineering. 2023. Vol. 35. Issue 9. DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-15185

17. Shrihari S., Seshagiri Rao M.V., Srinivasa Reddy V., Manasa A. Compatibility assessment of commercial cements with superplasticizers // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 184. P. 01079. DOI: 10.1051/e3sconf/202018401079

18. Лесовик В.С., Шеремет А.А., Чулкова И.Л., Журавлева А.Э. Геоника (геомиметика) и поиск оптимальных решений в строительном материаловедении // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2021. Т. 18. № 1 (77). С. 120–134. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134. EDN HMWWZK.

19. Лесовик В.С., Фомина Е.В. Новая парадигма проектирования строительных композитов для защиты среды обитания человека // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 10. С. 1241–1257. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1241-1257. EDN NPNPBT.

20. He D., Lu Z., Liang X., Liu R., Sun G. A study to improve the compatibility of PCE with cement paste containing clay // Materials Letters. 2022. Vol. 308. P. 131111. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131111

Поступила в редакцию 3 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 23 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 21 июля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Валерий Станиславович Лесовик — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций; Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; naukavs@mail.ru;

Даниил Александрович Толыпин — аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций; Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; tolypin.daniil@yandex.ru;

Наталья Максимовна Толыпина — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; SPIN-код: 4650-2537, ORCID: 0000-0001-5788-8520; tolypina.n@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Tolypina N., Tolypin D. Influence of mineral fillers on the liquishing of cement systems with the help of surfactants. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2022; 9:26-33. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-26-33. EDN ENFGLL. (rus.).
2. Rakhimbaev Sh.M., Tolypina N.M., Khakhal-eva E.N. Interrelation between plastic viscosity of cement systems and their rheological characteristics. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018; 15(2):(60):276-282. EDN XSDGCL. (rus.).
3. Lesovik V.S., Elistratkin M.Yu., Salmikova A.S., Kazlitina O.V. On the issue of improving the efficiency of high-strength self-compacting concretes. *Regional Architecture and Engineering*. 2021; 1(46):20-27. EDN DIRJUN. (rus.).
4. Ledenev A., Kozodaev S., Percev V., Baranov E., Zagoruyko T., Vnukov D. Mechanisms of act of various kinds of organic mineral additives in cement system. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2021; 9:8-19. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-9-8-19. EDN UFSCDT. (rus.).
5. Ghosal M., Chakraborty A.K. Superplasticizer compatibility with cement properties — a study. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 56:568-573. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.386
6. Shakhova L.D. On the compatibility of cements with plasticizing additives. *Journal Cement and its Applications*. 2024; 4:48-55. EDN DTZPCT. (rus.).
7. Ortiz-Álvarez N., Lizarazo-Marriaga J., Brandão P.F.B., Santos-Panqueva Y., Carrillo J. Rheological properties of cement-based materials using a bio-polymer viscosity modifying admixture (BVMA) under different dispersion conditions. *Cement and Concrete Composites*. 2021; 124:104224. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104224
8. Du J., Meng W., Khayat K.H., Bao Y., Guo P., Lyu Z. et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Part B: Engineering*. 2021; 224:109220. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109220
9. Pertsev V.T., Ledenev A.A. *Development of effective complex organomineral additives for regulating the rheological properties of concrete mixtures : monograph*. Voronezh, VSUACE, 2012; 135. EDN QNQCST. (rus.).
10. Chen J., Qiao M., Gao N., Wu J., Shan G., Zhu B. et al. Acrylate based post-acting polymers as novel viscosity modifying admixtures for concrete. *Construction and Building Materials*. 2021; 312:125414. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125414
11. Ferraz D.F., Martho A.C.R., Burns E.G., de Oliveira Romano R.C., Pileggi R.G. Effect of prehydration of Portland cement on the superplasticizer consumption and the impact on the rheological properties and chemical reaction. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2023; 16(2). DOI: 10.1590/s1983-41952023000-200010
12. Zhang Q., Chen J., Zhu J., Yang Y., Zhou D., Wang T. et al. Advances in organic rheology-modifiers (chemical admixtures) and their effects on the rheological properties of cement-based materials. *Materials*. 2022; 15(24):8730. DOI: 10.3390/ma15248730
13. Rakhimbaev Sh.M., Logvinenko A.A. Rheological properties of materials for transport infrastructural construction. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2014; 5(665):26-33. EDN SQTAGF. (rus.).
14. Khayat K.H., Meng W., Vallurupalli K., Teng L. Rheological properties of ultra-high-performance concrete — an overview. *Cement and Concrete Research*. 2019; 124:105828. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105828
15. Qiao M., Chen J., Gao N., Shan G., Wu J., Zhu B. et al. Effects of adsorption group and molecular weight of viscosity-modifying admixtures on the properties of cement paste. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2022; 34(7). DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004296
16. Ji X., Pan T., Zhao W., Liu J., Sha J., Han F. Interaction of superplasticizers with C3A: Understanding the superplasticizer compatibility with cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2023; 35(9). DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-15185
17. Shrihari S., Seshagiri Rao M.V., Srinivasa Reddy V., Manasa A. Compatibility assessment of commercial cements with superplasticizers. *E3S Web of Conferences*. 2020; 184:01079. DOI: 10.1051/e3sconf/20201-8401079
18. Lesovik V.S., Sheremet A.A., Chulkova I.L., Zhuravleva A.E. Geonics (Geomimetics) and search for optimal solutions in building materials science. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;

18(1):(77):120-134. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134. EDN HMWWZK. (rus.).

19. Lesovik V.S., Fomina E.V. The new paradigm of designing construction composites to protect the human environment. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2019; 14(10):1241-1257.

DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1241-1257. EDN NPNPBT. (rus.).

20. He D., Lu Z., Liang X., Liu R., Sun G. A study to improve the compatibility of PCE with cement paste containing clay. *Materials Letters*. 2022; 308:131111. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131111

Received March 3, 2025.

Adopted in revised form on May 23, 2025.

Approved for publication on July 21, 2025.

B I O N O T E S: **Valeriy S. Lesovik** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials Science, Products and Structures; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukov st., Belgorod, 308012, Russian Federation; naukavs@mail.ru;

Daniil A. Tolypin — postgraduate student of the Department of Building Materials Science, Products and Structures; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukov st., Belgorod, 308012, Russian Federation; tolypin.daniil@yandex.ru;

Natalia M. Tolypina — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction Materials Science, Products and Structures; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukov st., Belgorod, 308012, Russian Federation; SPIN-code: 4650-2537, ORCID: 0000-0001-5788-8520; tolypina.n@yandex.ru.

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

The authors declare no conflict of interest.

Совершенствование систем обратного осмоса, используемых для питьевого и технического водоснабжения

Алексей Германович Первов, Дмитрий Владимирович Спицов, Тет Зо Аунг,
Анна Сергеевна Кулагина

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Приводятся результаты новых исследований, проведенных для повышения эффективности получения питьевой воды. Экспериментально обоснованы новые технологические решения, позволяющие избежать осадкообразования на мембранах, сократить затраты на предочистку и радикально уменьшить сброс концентрата. Показано, как использование нанофильтрационных мембран с низкими селективными характеристиками дает возможность сократить эксплуатационные затраты, связанные с закупкой реагентов для предочистки и химических промывок и оплатой сброса концентрата в канализацию.

Материалы и методы. Экспериментально определены все технические параметры систем водоподготовки, включая: типы мембран и моделей мембранных элементов; число мембранных аппаратов на каждой ступени; рабочее давление; режимы проведения гидравлических и химических промывок; дозы реагентов. Представлены результаты обработки подземной воды с применением мембран в первой серии экспериментов, а также итоги исследования взаимосвязи между коэффициентом снижения объема K , общим солесодержанием и концентрацией кальция. Изучена зависимость снижения эффективности мембран от коэффициента K . Результаты второй серии экспериментов демонстрируют зависимости скоростей роста осадка карбоната кальция в мембранных элементах на первом и втором этапах очистки.

Результаты. На основании обработки экспериментальных данных представлены результаты расчетов количества мембранных элементов стандарта 8040 на каждой ступени очистки для установки производительностью 3 м³/ч, а также получены результаты экономических расчетов.

Выводы. Использование нанофильтрационных мембран на каждой ступени очистки позволяет избежать осадкообразования на мембранах и уменьшить затраты на эксплуатацию за счет отказа от ингибиторов и моющих растворов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обратный осмос, нанофильтрация, ингибиторы осадкообразования, осадкообразование на мембранах, сокращение расхода концентратов, снижение жесткости, установка обратного осмоса

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Первов А.Г., Спицов Д.В., Аунг Т.З., Кулагина А.С. Совершенствование систем обратного осмоса, используемых для питьевого и технического водоснабжения // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 9. С. 1354–1372. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1354-1372

Автор, ответственный за переписку: Анна Сергеевна Кулагина, anya.k.11@yandex.ru.

Improvement of reverse osmosis systems used for drinking and technical water supply

Alexei G. Pervov, Dmitriy V. Spitsov, Htet Zow Aung, Anna S. Kulagina

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

ABSTRACT

Introduction. The present paper shares new results of research devoted to improving the operation of conventional reverse osmosis. A new technological solution is proposed to escape scaling on the membrane surface. Applications of nanofiltration membranes provide a reduction of operation costs connected with chemical purchases to ensure pretreatment and chemical cleaning and also to pay for concentrate discharge into the sewer.

Materials and methods. In the paper, the experimental methods developed earlier were used, such as the evaluation of membrane rejection and control of permeate quality as a function of the initial feed water volume reduction coefficient K ; evaluation of calcium carbonate scaling rates and organic fouling rates in membrane modules. The experimentally obtained relationships are presented: dependencies of calcium concentrations and TDS values on the initial volume reduction coefficient K values and product flow reduction with K value relationships. Also, the second series results are presented that demonstrate dependencies of calcium carbonate growth rates on K .

Results. Results of the required numbers of membrane modules are obtained to tailor the 3 cubic metres per hour capacity membrane facility and the results of economic calculations are also obtained.

Conclusions. The use of nanofiltration membranes on each stage of water treatment allows for the escape of deposition of sparingly soluble salts on the membrane surface and excludes antiscalant dosing and routine membrane cleanings. The use of the developed technology featured by the low operational cost due to reduced reagent consumption and concentrate discharge into the sewer.

KEYWORDS: reverse osmosis, nanofiltration, scaling on membranes, membrane fouling, antiscalant, reduction of concentrate discharges, water softening, reverse osmosis plant

FOR CITATION: Pervov A.G., Spitsov D.V., Aung H.Z., Kulagina A.S. Improvement of reverse osmosis systems used for drinking and technical water supply. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(9):1354-1372. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1354-1372 (rus.).

Corresponding author: Anna S. Kulagina, anya.k.11@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время без мембран обратного осмоса и нанофильтрации невозможно представить развитие питьевого водоснабжения [1–4]. Это вызвано тем, что:

1. Мембраны одновременно задерживают ионы жесткости и железа, что необходимо при кондиционировании подземной воды.

2. Мембранная фильтрация эффективно удаляет из подземных вод ионы фтора, аммония, лития и стронция. Это свойство мембранных систем позволяет использовать для хозяйственно-питьевого водоснабжения ранее непригодные для потребления подземные воды.

3. Мембраны эффективно задерживают растворенные органические загрязнения, дают возможность без применения реагентов снизить цветность и окисляемость воды.

4. Сегодня в мировой практике мембраны находят активное применение на крупных станциях питьевого водоснабжения. Это связано с малой эффективностью существующих коагуляционных технологий снизить цветность, а также необходимостью убрать из воды продукты хлорирования и озонлиза. Мембраны используются в этом случае как простой метод, позволяющий без реагентов и расходных материалов удалить растворенные органические вещества с низким молекулярным весом вместо применения озонсорбции.

5. Важной новой областью применения мембран являются системы автономного водоснабжения удаленных жилых объектов. В этих случаях от мембран требуется одновременное решение проблем подготовки качественной питьевой воды, воды для горячего водоснабжения и отопления, а также контуров охлаждения (кондиционирования) и увлажнения воздуха.

Быстрому и эффективному внедрению этого эффективного метода в практику питьевого водоснабжения мешает ряд предубеждений, сложившихся в период, когда строительство и эксплуатация мембранных систем делали только первые шаги. Эти предубеждения основаны на следующих понятиях:

1. Обратноосмотические мембраны производят обессоленную воду с низким содержанием жестко-

сти и ряда компонентов, делая воду гигиенически «неполноценной».

2. Системы обратного осмоса требуют высоких эксплуатационных затрат на предочистку и предотвращение осадкообразования на мембранах.

3. Системы обратного осмоса разделяют воду на пермеат (очищенную воду) и концентрат. До сих пор не решена проблема: куда девать сбросные потоки концентрата, которые составляют до 30 % от расходов очищаемой воды.

Исследования, проведенные на кафедре водоснабжения и водоотведения Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), привели к разработке инновационных технологических решений. Эти исследования направлены на эффективное решение ключевых задач обеспечения населения чистой питьевой водой высокого качества [5, 6]:

1. При очистке подземных вод предлагается более совершенная технология очистки, умягчения и обессоливания воды с использованием нанофильтрационных мембран. Благодаря низким значениям селективности нанофильтрационных мембран по одновалентным ионам при обработке воды удастся избежать образования на мембранах осадков малорастворимых солей и не применять в технологии ингибиторы образования солевых отложений, что позволяет существенно сократить эксплуатационные затраты. Применение нанофильтрационных мембран открывает возможности для решения актуального вопроса, связанного с качеством питьевой воды, который не может быть эффективно решен с помощью технологии обратного осмоса — это управление ионным составом очищенной воды. В тех ситуациях, когда концентрация трудноудаляемых из воды загрязнений, представленных однозарядными ионами (таких как, например, литий или аммоний), в исходной воде превышает нормативные значения в 10 и более раз, а жесткость воды имеет невысокое значение, можно получить очищенную воду с оптимальным составом: заданным значением лития и увеличенной жесткостью. Эту технологию назвали «технологией разделения ионов» [6].

2. Используя мембранную технологию для очистки поверхностных вод, возможно решить задачу уда-

ления загрязнений из фугата, образующегося в процессе обезвоживания осадка [6].

3. В процессе очистки поверхностной воды методом нанофильтрации образующийся концентрат подвергается совместной утилизации с обезвоженным осадком. Смешивание концентрата с осадком, направляемым на обезвоживание, осуществляется в осадкоуплотнителе. В результате обезвоживания получается осадок влажностью 80 % и фугат. Фугат смешивается с водой после отстаивания осадка в осадкоуплотнителе и направляется на мембранную установку для разделения на пермеат и концентрат. Пермеат представляет собой очищенную воду. Концентрат возвращается в осадкоуплотнитель. Расход концентрата соответствует расходу воды, который находится в обезвоженном осадке и выводится из системы очистки. Благодаря такой схеме все загрязнения, поступающие в осадкоуплотнитель с осадком и концентратом, удаляются вместе с осадком.

4. Разработанная авторами технология «разделения ионов» дает возможность управлять ионным составом очищенной воды, увеличивая жесткость и соледержание очищенной воды и при этом позволяя увеличить кратность объемного концентрирования и сократить объем концентрата, удаляемого с осадком.

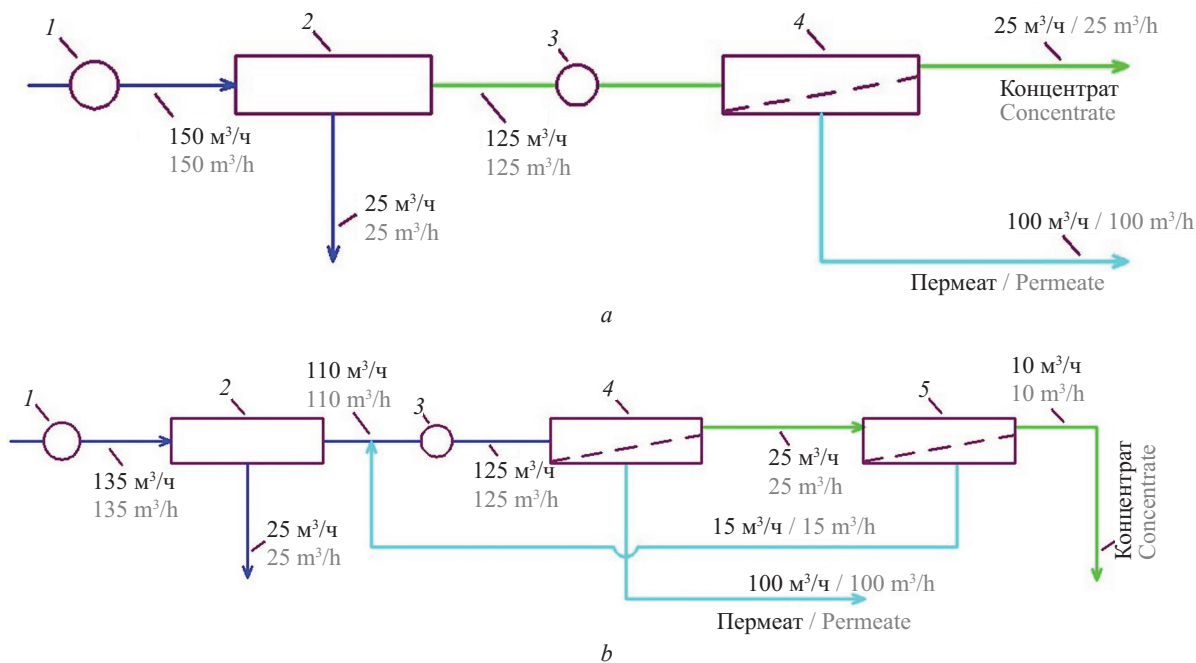
5. Технология «разделения ионов» — эффективный метод для выделения раствора хлорида натрия из концентратов мембранных установок. Полученный концентрированный раствор хлорида натрия может быть использован в качестве сырья для получения гипохлорита посредством электролитического метода.

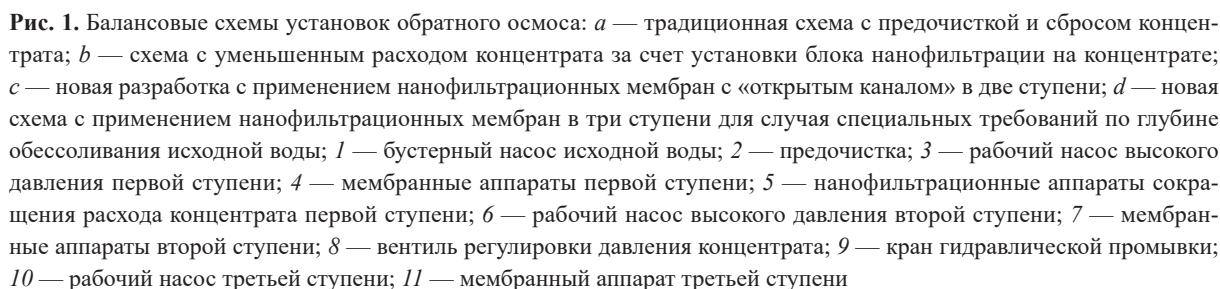
6. В ряде случаев при создании систем питьевого водоснабжения оказывается невозможным сброс сточных вод, образующихся при очистке воды — фу-

гатов после обезвоживания, вод промывки фильтров, концентратов мембранных установок. Это имеет место в случаях, когда станция очистки располагается вблизи водозабора и удалена от городских сетей водоотведения. Для этих случаев разработана технология глубокого сокращения расхода концентрата с выделением из него осадка карбоната кальция и гидроокиси железа и вывоза твердых отходов (обезвоженных осадков) автотранспортом [6].

Расходы на реагенты — существенная составляющая затрат на технологию обратного осмоса. Помимо расходов на предварительную очистку воды, значительная часть затрат на технологию обратного осмоса связана с приобретением реагентов. К ним относятся ингибиторы образования малорастворимых солей, добавляемые в исходную воду, а также реагенты для проведения химических промывок и растворения отложений, накапливающихся на мембранах.

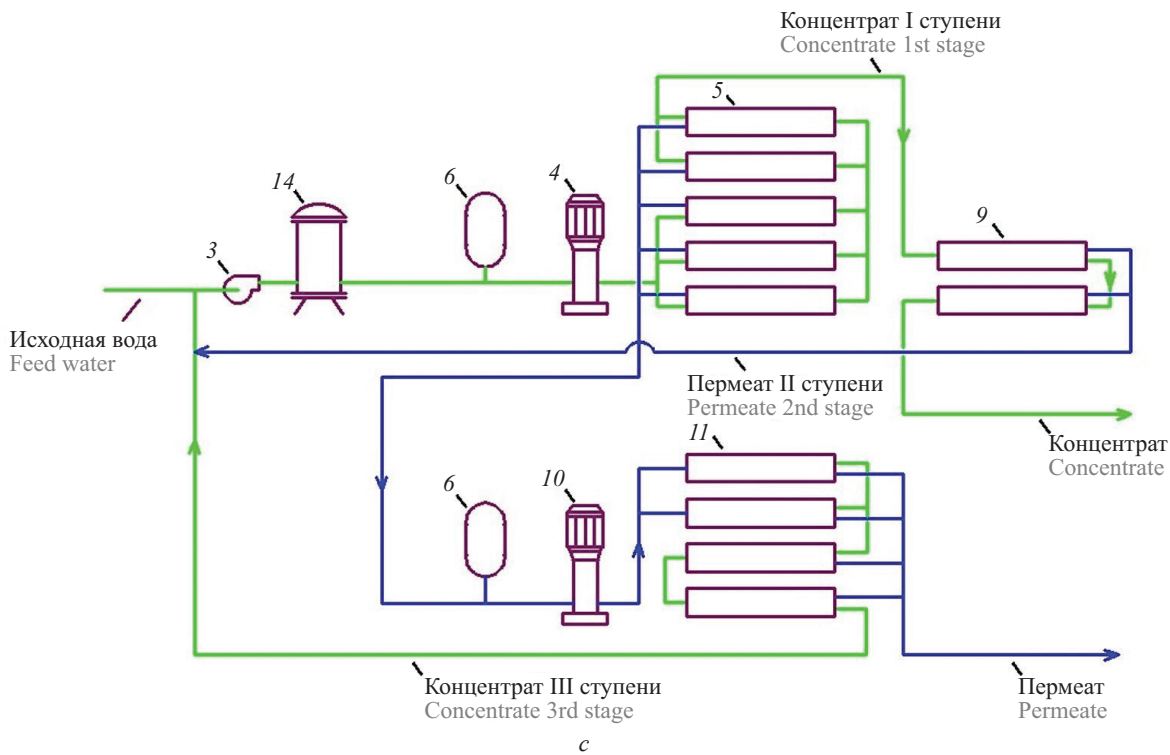
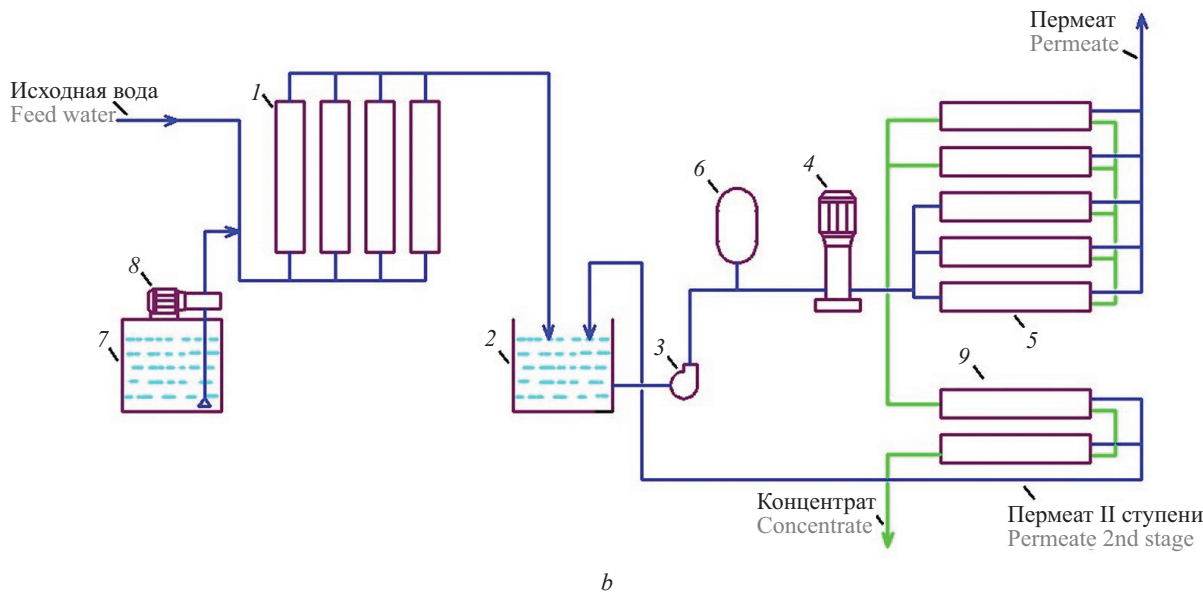
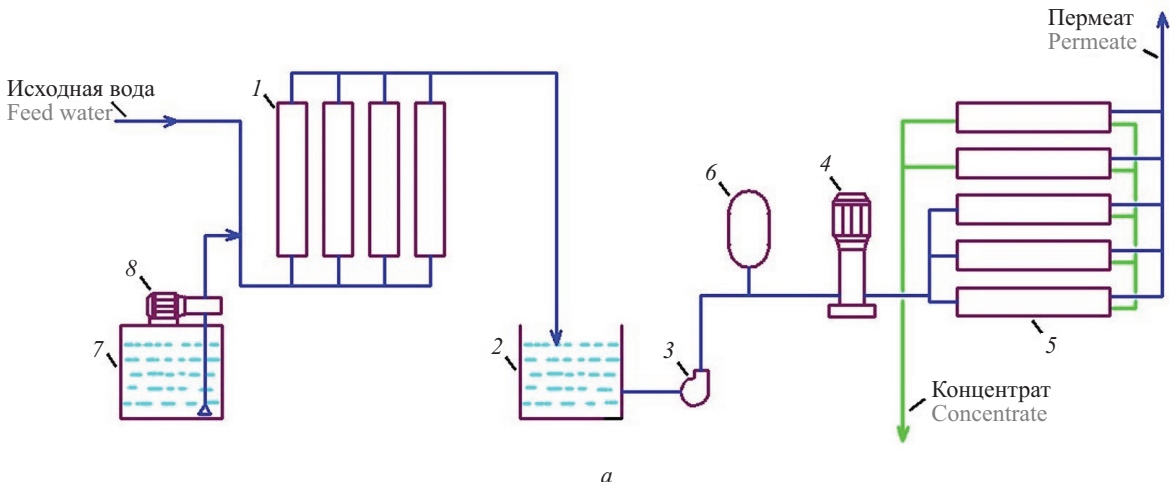
Сокращение расхода концентрата осуществляется с помощью нанофильтрационных мембран. Благодаря низкой селективности нанофильтрационных мембран по одновалентным ионам удастся решить сразу две задачи: сократить расход концентрата и при этом избежать интенсивного образования осадков малорастворимых солей на мембранах [5–15]. На рис. 1, *b* представлена схема сокращения расхода концентрата установки обратного осмоса. Данная схема предусматривает использование дополнительной ступени очистки концентрата с применением нанофильтрационных мембран. Первая ступень мембранной установки обеспечивает получение воды заданного качества. Образующийся при этом концентрат поступает во вторую ступень, где подвергается обработке нанофильтрационными мембранами. На второй ступени происходит разделение концентрата на пермеат и новый концентрат. Низкая селек-





тивность нанофильтрационных мембран приводит к тому, что ионный состав пермеата второй ступени приближается к составу исходной воды. По этой причине пермеат второй ступени направляется обратно в установку и смешивается с исходной водой. Использование данной схемы позволяет уменьшить расход концентрата в 3–6 раз по сравнению с одноступенчатой схемой.

В настоящей работе авторами рассматривается применение новых технологий, основанных на использовании мембранных аппаратов с «открытым» каналом [6]. Применение аппаратов традиционной



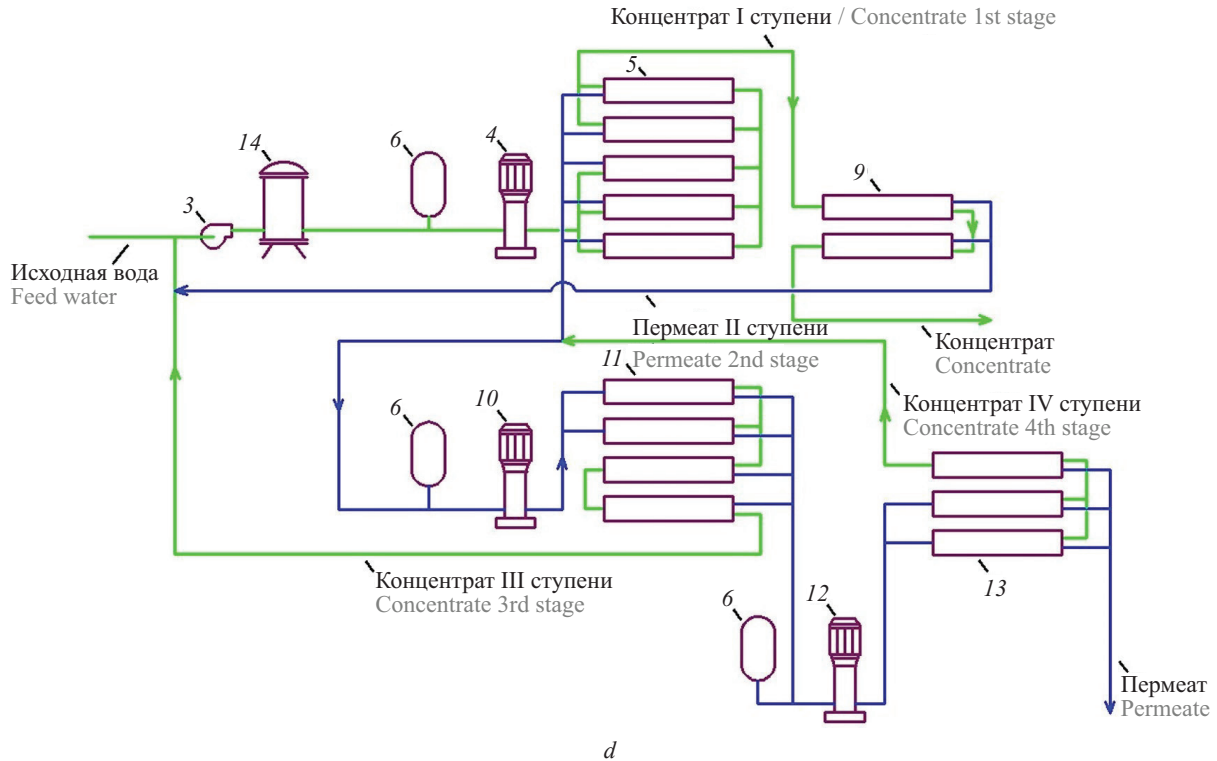


Рис. 2. Гидравлические схемы мембранных установок, представленных на рис. 1: *a* — традиционная схема установок обратного осмоса; *b* — установка со ступенью сокращения расхода концентрата; *c* — новая разработка: двухступенчатая схема с применением нанофильтрационных аппаратов с «открытым каналом»; *d* — трехступенчатая схема с нанофильтрационными аппаратами для случая особо жестких требований по глубине обессоливания; 1 — ультрафильтрация для предочистки; 2 — промежуточный бак осветленной воды; 3 — бустерный насос подачи осветленной воды на мембранную установку; 4 — рабочий насос высокого давления; 5 — мембранные аппараты первой ступени; 6 — бак-гидроаккумулятор; 7 — бак дозирования коагулянта; 8 — насос-дозатор коагулянта; 9 — мембранные аппараты сокращения расхода концентрата первой ступени; 10 — рабочий насос второй ступени; 11 — мембранные аппараты второй ступени; 12 — рабочий насос третьей ступени; 13 — мембранные аппараты третьей ступени; 14 — патронный (или дисковый) фильтр предочистки

Fig. 2. Hydraulic diagrams of membrane units shown in Fig. 1: *a* — traditional diagram of reverse osmosis units; *b* — unit with a stage of concentrate flow reduction; *c* — new development: two-stage diagram using nanofiltration units with an “open channel”; *d* — three-stage diagram with nanofiltration units for the case of particularly stringent requirements for the depth of desalination; 1 — ultrafiltration system for pre-treatment; 2 — intermediate tank for clarified water; 3 — booster pump for feeding clarified water to the membrane unit; 4 — high-pressure working pump; 5 — first-stage membrane units; 6 — hydraulic accumulator tank; 7 — coagulant dosing tank; 8 — coagulant dosing pump; 9 — first-stage membrane units for concentrate flow reduction; 10 — second-stage working pump; 11 — second stage membrane devices; 12 — third stage working pump; 13 — third stage membrane devices; 14 — cartridge (or disk) pre-filter

конструкции (с турбулизаторной сеткой в канале) вызывает быстрое увеличение сопротивления канала при образовании отложений коллоидных, взвешенных и органических веществ и, как следствие, быструю потерю мембранами производительности. Использование в аппаратах нанофильтрационных мембран с низким значением селективности позволяет избежать образования застойных зон и интенсивного образования осадков малорастворимых солей [17, 18]. Нанофильтрационные мембранные в аппарате с «открытым» каналом позволяют не применять ингибиторы образования осадков малорастворимых солей. Работа установок, использующих аппараты с «открытым каналом» и нанофильтрационные мембраны, показана на рис. 1, с.

Вместо применения обратноосмотических мембран, обеспечивающих снижающие концентрации ионов жесткости в 30–50 раз, используются нанофильтрационные мембраны в две ступени, каждая из которых снижает жесткость в 4–10 раз. Низкая селективность нанофильтрационных мембран предотвращает пересыщение раствора и последующее осаждение карбоната кальция в каналах мембранных элементов. В случае образования осадков взвешенных и коллоидных частиц на первой ступени очистки система автоматически запускает гидравлические промывки со сбросом давления (рис. 1, с). «Открытая» структура каналов с увеличенным живым сечением потока обеспечивает минимальное

гидравлическое сопротивление, что способствует эффективности промывок со сбросом давления.

Показанная на рис. 1, с схема дает только общие представления о работе мембранной технологии. В зависимости от величины жесткости воды, значения общего солесодержания, расхода концентрата, глубины умягчения и других требований количество ступеней и модели используемых мембранных аппаратов могут быть изменены. При необходимости получения глубоко умягченной воды в схеме (рис. 1, с) могут быть применены низконапорные обратноосмотические мембраны, что потребует использования в технологии ингибиторов для предотвращения образования осадков карбоната кальция. Для сокращения расходов на реагенты решено использовать нанофильтрационные мембранные аппараты не в две, а в три ступени (рис. 1, d). Целесообразность применения таких решений определяется на основе проведения технико-экономического обоснования [19, 20]. На рис. 2 приведены схемы установок, представленных на рис. 1, с указанием насосов и мембранных аппаратов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основная цель экспериментов состояла в определении всех технических параметров мембранной водоочистной установки, позволяющих получить воду заданного качества. В процессе экспериментов установлены:

- модели мембранных аппаратов и требуемые показатели их селективности;
- необходимая площадь поверхности мембран на каждой ступени очистки;

• определенное рабочее давление на каждой ступени;

• периодичность выполнения гидравлических прочисток с разгрузкой давления и продолжительность этих процедур;

• объем реагентов, необходимых для проведения химических промывок на каждом этапе;

• дозы ингибиторов для случаев использования на второй ступени мембран с высокой селективностью.

Рис. 3 демонстрирует схему экспериментальной установки.

Использовались разработанные ранее методики [4–6]:

1. Определение состава пермеата и концентрата в зависимости от коэффициента снижения объема.

2. Определение влияния солесодержания обрабатываемой воды и коэффициента снижения объема исходной воды на производительность мембранного элемента. Коэффициент снижения объема устанавливается как отношение расхода исходной воды, поступающей в мембранный аппарат, к расходу концентрата.

3. Определение скоростей образования отложений на мембранах.

Исходная вода из емкости 1 под воздействием насоса 2 поступала в мембранный аппарат (рис. 3), где подвергалась процессу разделения на две составляющие: пермеат — очищенную воду, прошедшую через мембрану; концентрат — поток воды, содержащий все примеси, задержанные мембраной. Концентрат возвращался в емкость 1, а пермеат направлялся в баки 4 и 5 в соответствии с величиной коэффициента K . Для измерения рабочего давления

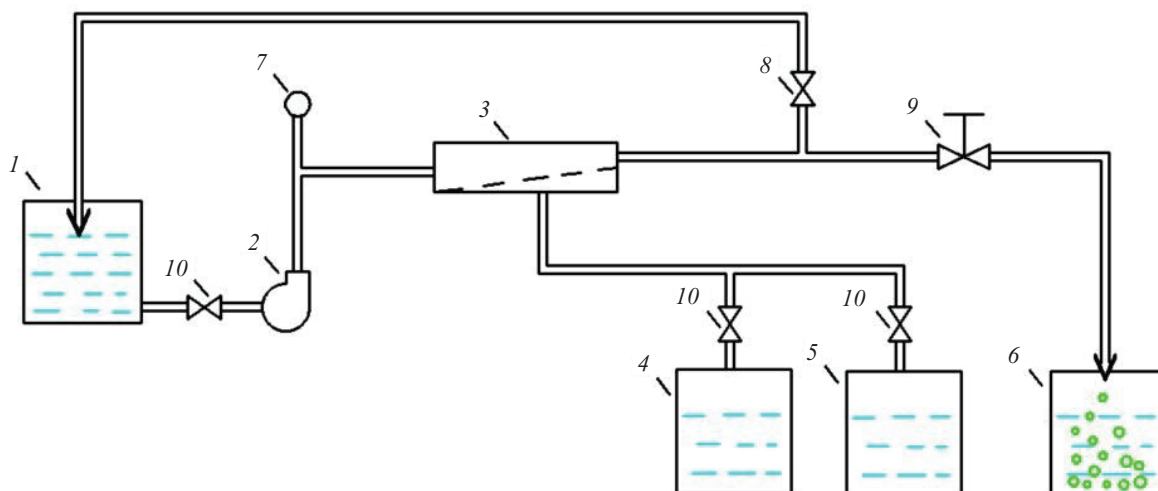


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 — бак исходной воды; 2 — рабочий насос; 3 — мембранный аппарат; 4, 5 — баки сбора пермеата; 6 — бак сбора концентрата после гидравлической промывки; 7 — манометр; 8 — регулирующий клапан; 9 — кран сброса давления при гидравлической промывке; 10 — шаровые краны

Fig. 3. Flow diagram of membrane test unit: 1 — feed water tank; 2 — rotary pump; 3 — membrane spiral wound module in the plastic pressure vessel; 4, 5 — product water collection tanks; 6 — concentrate collection tank after hydraulic washing; 7 — pressure gauge; 8 — pressure regulation valve; 9 — hydraulic flushing valve; 10 — shut-off valves

в аппарате 2 применялся манометр 7. В ходе экспериментальной работы использовались мембранные рулонные элементы стандарта 1812 с обратноосмотическими мембранами типа BLN, нанофильтрационными мембранами типа 70 NE производства компании TORAY (Япония) и нанофильтрационными мембранами nanoNF производства компании «Рос-Нанотех» (г. Владимир, Российская Федерация).

Целью экспериментальных исследований являлось получение воды, пригодной для использования в водогрейных котлах, из подземного источника с высокой общей жесткостью (не менее 8–9 мг-экв/л). Для достижения требуемого уровня жесткости воды для водогрейных котлов (150 мкг-экв/л) необходимо снизить первоначальную жесткость подземной воды в 40–50 раз.

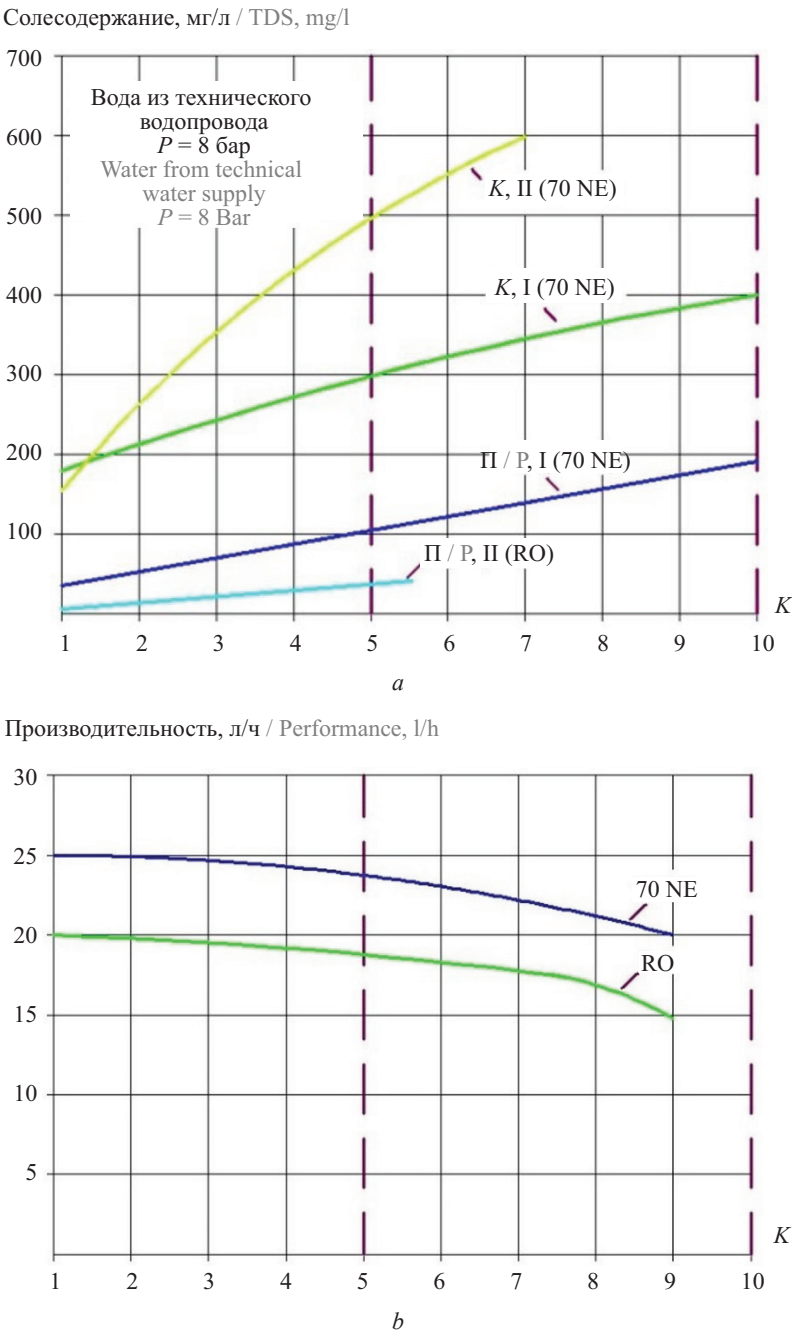


Рис. 4. Исследование эффективности очистки воды, полученной из технического водопровода: *a* — зависимость общего содержания солей в пермеатах и концентратах различных мембран на различных этапах очистки; *b* — зависимость снижения производительности мембранных элементов от *K*

Fig. 4. Experimental results. Efficiency of water purification from industrial water supply: *a* — dependences of the value of total salt content of permeates and concentrates of various membranes at different stages of purification; *b* — dependences of the decrease in the productivity of membrane elements on *K*

Табл. 1. Результаты обработки воды из водопровода с применением мембран nanoNF

Table 1. Results of water treatment using nanoNF membranes

Показатели Indicators	Исходная вода Feed water	Пермеат I ступень 1st stage permeate	Пермеат II ступень 2nd stage permeate	Пермеат III ступень 3rd stage permeate	Концентрат, $K = 10$ Concentrate, $K = 10$
Кальций, мг-экв/л Calcium, meq/l	3,6	0,8	0,25	<0,1	28,0
Магний, мг-экв/л Magnesium, meq/l	0,55	0,24	0,08	<0,1	3,0
Общая жесткость, мг-экв/л Hardness, meq/l	4,15	1,04	0,25	<0,1	31,0
Хлороформ, мг/л Chloroform, mg/l	11	5,1	2,7	1,3	98,1
Сульфаты, мг/л Sulfates, mg/l	28	4,4	0,9	0,2	271
Бикарбонаты, мг-экв/л Bicarbonates, meq/l	4,1	1,2	0,5	0,24	29,2
Натрий + калий, мг/л Sodium + potassium, mg/l	19,1	10,4	6,2	2,9	92,0
Железо, мг/л Iron, mg/l	1,5	0,2	—	—	13,0
Общее солесодержание, мг/л TDS, mg/l	320	124	50	18	1810
pH	7,5	7,2	7,0	6,9	7,6

В ходе экспериментального исследования сравнивались две технологические схемы очистки воды, предусматривающие применение различных типов мембран. В рамках первой схемы первичная обработка воды осуществлялась с помощью нанофильтрационных мембран марки nanoNF, а последующая очистка — с применением обратноосмотических мембран марки BLN.

Согласно второй схеме обработки воды, на начальном этапе применялись нанофильтрационные мембраны типа 70 NE, а на последующем этапе — обратноосмотические мембраны типа BLN.

Рис. 4, *a* демонстрирует корреляцию между общим содержанием солей в концентрате и пермеате и значением коэффициента K на первой и второй стадиях процесса. Рис. 4, *b* иллюстрирует зависимость производительности мембран на первой и второй ступенях очистки от значения коэффициента K .

В табл. 1 приведены результаты обработки воды из водопровода с применением мембран nanoNF.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе экспериментальных исследований, проводившихся в рамках двух серий, оценивалась эффективность мембранных элементов nanoNF для уменьшения общей жесткости воды при их ис-

пользовании на различных стадиях многоступенчатой очистки. Первая серия экспериментов была посвящена изучению эффективности применения мембран nanoNF на первой, второй и при необходимости третьей ступени очистки. Во второй серии экспериментов исследовалась эффективность использования нанофильтрационных мембран 70 NE на первой и второй ступенях очистки. Эффективность применения обратноосмотических мембран BLN на второй ступени очистки оценивалась в рамках обеих серий исследований (рис. 4). Следует отметить, что, помимо эффективности снижения жесткости, критически важна стойкость мембранных элементов к образованию осадков солей жесткости (преимущественно карбоната кальция). На рис. 5 представлены результаты определения скоростей образования осадка карбоната кальция в установках с мембранами nanoNF и 70 NE на различных стадиях многоступенчатой очистки. Для выявления интенсивности образования на различных мембранах осадков карбоната кальция использовалась методика, описанная в работе [19]. Полученные в результате проведения экспериментов зависимости концентраций ионов кальция в концентратах различных мембранных аппаратов на первой, второй и третьей ступенях очистки в зависимости от значения коэффициента снижения объема исходной воды K показаны на рис. 6.

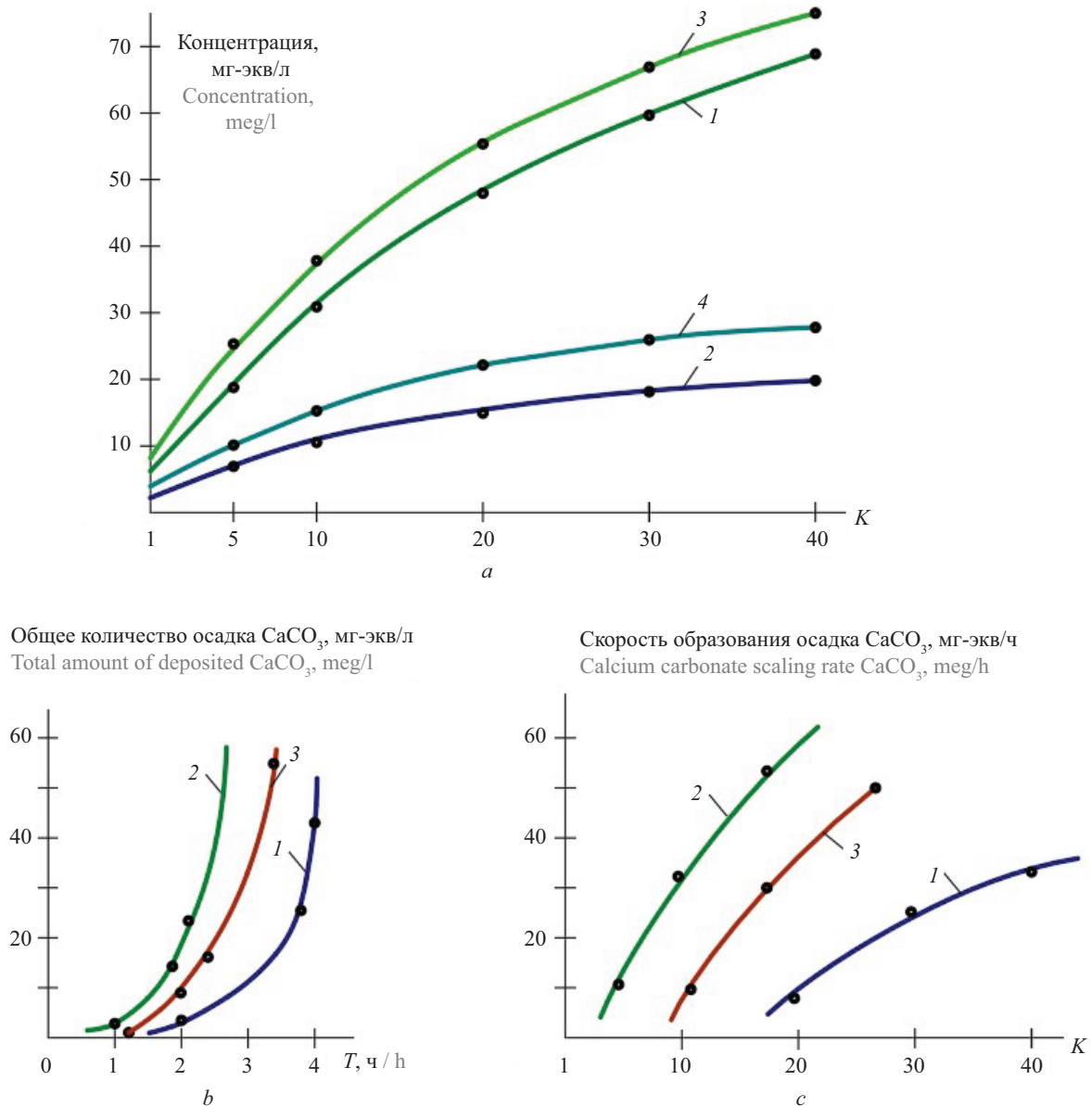


Рис. 5. Определение скоростей осадкообразования карбоната кальция в аппаратах с мембранами nanoNF и 70 NE: *a* — зависимости концентраций ионов кальция и бикарбонат-ионов от *K*; *b* — зависимости общего количества образовавшегося осадка от времени эксперимента; *c* — зависимости скоростей роста осадка от *K*; 1 — мембраны nanoNF; 2 — мембраны 70 NE

Fig. 5. Determination of calcium carbonate precipitation rates in devices with nanoNF and 70 NE membranes: *a* — dependence of calcium and bicarbonate ion concentrations on *K*; *b* — dependence of the total amount of formed precipitation on the time of the experiment; *c* — dependence of the precipitation growth rates on *K*; 1 — nanoNF membranes; 2 — 70 NE membranes

На рис. 7 изображена методика определения необходимой площади поверхности мембранных элементов на каждом этапе очистки. Данный метод основан на экспериментальных данных, устанавливающих зависимость производительности мембранного элемента от коэффициента снижения объема *K*.

В двух диапазонах изменения *K* (от 1 до 5) и (от 5 до 10) выбираем среднее значение производительности мембранного элемента. Выбираем на рис. 1 балансовую схему установки (в нашем случае рис. 1, *c*) и делаем расчет установки производительностью 10 м³/ч, при этом все показатели

расходов на балансовой схеме следует разделить на 10. Принимая во внимание тот факт, что площадь мембран в стандартном мембранном элементе модели 1812 составляет 0,5 м², для определения площади мембран nanoNF, используемых на первой ступени, необходимо разделить расход аппаратов первой ступени на удельную производительность одного элемента, л/ч·м². Аналогичным образом вычисляется требуемая площадь мембран BLN на второй ступени. В случае необходимости уменьшения расхода концентрированного раствора рассчитывается требуемое количество мембранных аппаратов

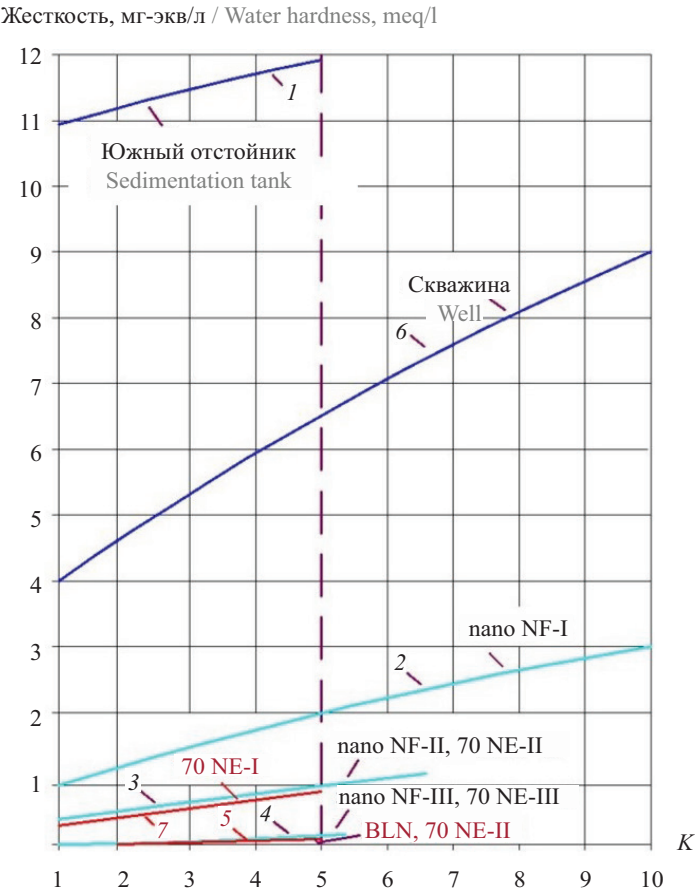


Рис. 6. Результаты определения общей жесткости в пермеатах различных мембран на разных ступенях очистки
Fig. 6. Results of determining the total hardness in permeates of different membranes at different stages of purification

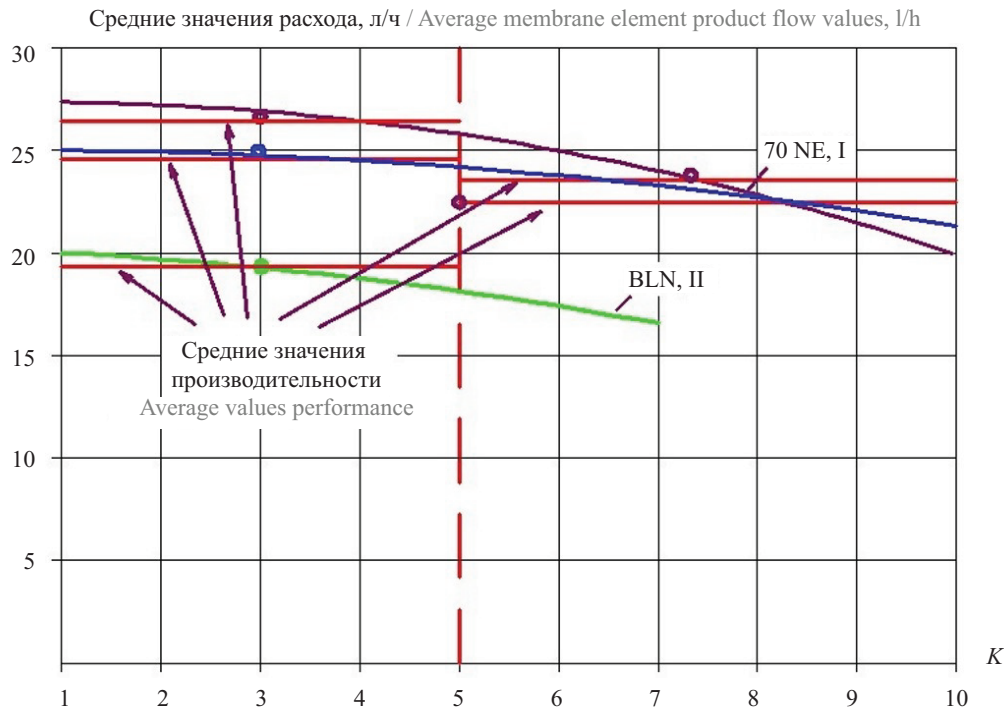


Рис. 7. Определение величин средней производительности мембранных элементов на разных ступенях очистки для расчета требуемого количества мембранных элементов
Fig. 7. Determination of the average performance values of membrane elements at different stages of purification for calculating the required number of membrane elements

типа 8040 с мембранами nanoNF, устанавливаемых на третьей ступени (для минимизации расхода концентрированного раствора).

Табл. 2 демонстрирует результаты расчета необходимой площади поверхности мембран для каждой ступени и количества мембранных аппаратов, используемых на каждой ступени. Расчеты выполнены для технологических схем мембранных установок, представленных на рис. 1, с; 2, с. Выбор типа мембран для каждой ступени осуществлен на основе анализа их эффективности в снижении общей жесткости воды. В рамках решения поставленной задачи авторы рассмотрели три варианта возможных технологических схем:

1. Схему с мембранами nanoNF на первой ступени и обратноосмотическими мембранами BLN на второй ступени. Эффективность схемы для получения высококачественной умягченной воды, отвечающей требованиям подачи воды в водогрейные котлы, не вызывает сомнений. Опасение вызывает необходимость дозирования в исходную воду второй ступени ингибитора образования осадка карбоната кальция, что снижает надежность работы установки и, как будет показано ниже, существенно увеличивает эксплуатационные затраты.

2. Схему с мембранами 70 NE на первой ступени и на второй ступени. Такая схема также требует дозирования ингибитора осадкообразования в исходную воду. Однако, как показал опыт применения мембран 70 NE, интенсивность осадкообразования в аппаратах с этими мембранами оказывается значительно ниже, чем в аппаратах с обратноосмотическими мембранами. При этом нанофильтрационные мембраны работают при низком давлении (8 бар), что также сказывается на величине эксплуатационных затрат.

3. Представляет интерес использовать трехступенчатую схему (рис. 1, d; 2, d). Возможно на каждой ступени применять мембраны nanoNF, в которых образование карбоната кальция в исследуемом диапазоне составов воды исключено.

С целью экономического обоснования выбора мембран для подготовки воды для водогрейных котлов рассматривались три схемы:

1) двухступенчатая схема: первая ступень включает использование нанофильтрационных мембран типа nanoNF; вторая ступень оснащена обратноосмотическими мембранами типа BLN;

2) двухступенчатая схема: обе ступени очистки реализованы с применением нанофильтрационных мембран типа 70 NE;



a



b

Рис. 8. Общий вид нанофильтрационной системы «нового поколения» с тремя ступенями очистки для производства питьевой воды, горячей воды и воды для питания водогрейных котлов производительностью 3 м³/ч (рис. 1, d; рис. 2, d; табл. 2)

Fig. 8. General view of the “new generation” nanofiltration system with three purification stages for the production of drinking water, hot water and water for feeding hot water boilers with a capacity of 3 m³/hour (Fig. 1, d; 2, d; Table 2)

Табл. 2. Расчет основных эксплуатационных затрат для установки подготовки воды для котельных 1 и 2 из воды технического водопровода
Table 2. Calculation of basic operating costs for a unit with a capacity of 3 cubic metres per hour for preparing water for Boiler Rooms 1 and 2 from technical water supply

Номер Number	Составляющие затрат Operational costs	Схема 1 Flow diagram 1	Схема 2 Flow diagram 2	Схема 3 Flow diagram 3
		I ступень — nanoNF II ступень — BLN I stage — nanoNF II stage — BLN	I ступень — 70 NE II ступень — 70 NE I stage — 70 NE II stage — 70 NE	I ступень — nanoNF II ступень — nanoNF III ступень — nanoNF I stage — nanoNF II stage — nanoNF III stage — nanoNF
1	Подача исходной воды Feed water flow	–	–	–
1.1	I ступень / I stage	4,5	4,5	4,8
1.2	II ступень / II stage	3,6	3,6	4,0
1.3	III ступень / III stage	–	–	3,6
2	Рабочее давление Working pressure	–	–	–
2.1	I ступень / I stage	8	8	8
2.2	II ступень / II stage	12	8	8
2.3	III ступень / III stage	–	–	8
3	Удельный расход электроэнергии Specific power consumption	–	–	–
3.1	I ступень / I stage	0,5	0,5	0,5
3.2	II ступень / II stage	0,75	0,5	0,5
3.3	III ступень / III stage	–	–	0,5
4	Годовые затраты на электроэнергию Electric power costs	(… · 7000 · 5 руб. / rub)		
4.1	I ступень / I stage	4,5 · 0,5 · 7000 · 5 = 78 750,00	4,5 · 0,5 · 7000 · 5 = 78 750,00	4,8 · 0,5 · 7000 · 5 = 84 000,00
4.2	II ступень / II stage	3,6 · 0,75 · 7000 · 5 = 94 500,00	3,6 · 0,5 · 7000 · 5 = 63 000,00	4 · 0,5 · 7000 · 5 = 70 000,00
4.3	III ступень / III stage	–	–	3,6 · 0,5 · 7000 · 5 = 63 000,00

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Номер Number	Составляющие затрат Operational costs	Схема 1 Flow diagram 1	Схема 2 Flow diagram 2	Схема 3 Flow diagram 3
		I ступень — nanoNF II ступень — BLN I stage — nanoNF II stage — BLN	I ступень — 70 NE II ступень — 70 NE I stage — 70 NE II stage — 70 NE	I ступень — nanoNF II ступень — nanoNF III ступень — nanoNF I stage — nanoNF II stage — nanoNF III stage — nanoNF
4.4	Годовые затраты на электроэнергию, руб./год Annual electric power costs, rub/year	173 250,00	141 750,00	217 000,00
5	Затраты на замену мембран Membrane replacement costs	–	–	–
5.1	Количество мембран / модель Number of membranes / model	–	–	–
5.1.1	I ступень / I stage	3 / nanoNF	4 / 70 NE	4 / nanoNF
5.1.2	II ступень / II stage	3 / BLN	3 / 70 NE	3 / nanoNF
5.1.3	III ступень / III stage	–	–	3 / nanoNF
5.2	Годовая стоимость замены мембран Annual membrane replacement costs	–	–	–
5.2.1	I ступень / I stage	3 · 50 000/5 = 30 000,00	4 · 50 000/5 = 40 000,00	4 · 50 000/5 = 40 000,00
5.2.2	II ступень / II stage	3 · 50 000/5 = 30 000,00	3 · 50 000/5 = 30 000,00	3 · 50 000/5 = 30 000,00
5.2.3	III ступень / III stage	–	–	3 · 50 000/5 = 30 000,00
5.3	Итого стоимость замены мембран, руб./год Annual membrane replacement costs, rub/year	60 000,00	70 000,00	100 000,00
6	Годовые затраты на ингибитор, руб. Antiscalant annual costs evaluation, rub	–	–	–
6.1	Доза ингибитора, г/м³ Antiscalant dose, ppm	–	–	–
6.1.1	I ступень / I stage	–	5	–
6.1.2	II ступень / II stage	10	–	–
6.1.3	III ступень / III stage	–	–	–
6.2	Расход ингибитора, кг/ч · 7000 Antiscalant consumption, kilos per hour · 7,000	–	–	–

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Номер Number	Составляющие затрат Operational costs	Схема 1 Flow diagram 1	Схема 2 Flow diagram 2	Схема 3 Flow diagram 3
		I ступень — nanoNF II ступень — BLN I stage — nanoNF II stage — BLN	I ступень — 70 NE II ступень — 70 NE I stage — 70 NE II stage — 70 NE	I ступень — nanoNF II ступень — nanoNF III ступень — nanoNF I stage — nanoNF II stage — nanoNF III stage — nanoNF
6.2.1	I ступень / I stage	–	0,023	–
6.2.2	II ступень / II stage	0,045	–	–
6.2.3	III ступень / III stage	–	–	–
6.3	Годовое потребление ингибитора, кг Annual consumption of antiscalant, kg	315	160	–
6.4	Годовые затраты на ингибитор, руб./год · 7000 · 1200 Antiscalant annual costs, rub/year · 7000 · 1200	378 000,00	189 000,00	–
7.1	Затраты на моющие растворы · количество промывок в год Cost of cleaning solutions · number of washes per year			
7.1.1	Количество реагентов для промывки I ступени, кг The amount of cleaning chemicals to clean the first stage, kilos	6 · 1 = 6	8 · 4 = 32	8 · 1 = 8
7.1.2	Количество реагентов для промывки II ступени, кг The amount of cleaning chemicals to clean the second stage, kilos	6 · 6 = 36	6 · 1 = 6	6 · 1 = 6
7.1.3	Количество реагентов для промывки III ступени, кг The amount of cleaning chemicals to clean the first stage, kilos	–	–	–
7.2	Годовые затраты на промывки · 1000 Annual cleaning costs evaluation · 1,000	42 000,00	38 000,00	14 000,00
8	Затраты на водоотведение Water disposal costs	–	–	–
8.1	Тариф на сброс 40 руб./м³ Discharge rate 40 rub/m³	–	–	–
8.2	Годовой сброс, м³ Annual discharge, cubic meters	2 100	2 100	2 100
8.3	Годовые расходы на сброс, руб./год Annual cleaning costs, rub/year	84 000,00	84 000,00	84 000,00
9	Итого годовые затраты по всем пунктам, руб./год Total annual costs, rub per year	737 250,00	522 750,00	415 000,00
10	Стоимость установок, руб. Membrane facility capital costs, rub	2 200 000,00	2 400 000,00	2 600 000,00

3) трехступенчатая схема: на первой и второй ступенях используются мембраны типа nanoNF. Третья ступень оборудована нанофильтрационными мембранами типа 70 NE, что обеспечивает получение высококачественной умягченной воды.

В табл. 2 представлены данные о необходимом количестве мембранных элементов стандарта 8040 для каждой ступени очистки в мембранной установке, рассчитанной на производительность 3 м³/ч.

Для сравнения экономических показателей каждой схемы определены [3]:

- значение годовых энергозатрат;
- годовые затраты на замену мембран из расчета их замены один раз в 5 лет;
- годовые затраты на ингибиторы;
- годовые затраты на моющие растворы.

В табл. 2 приведено сравнение величин годовых эксплуатационных затрат установки производительностью 3 м³/ч для очистки подземной воды с целью получения воды, используемой для питания водогрейных котлов (рис. 8).

Затраты на электроэнергию рассчитываются исходя из требуемого расхода и напора насосных агрегатов. При рабочем давлении 16 бар расход электроэнергии составляет 1 кВт/м³, при давлении 7 бар — соответственно 0,5 кВт/м³, и при давлении 12 бар — 0,75 кВт/м³. Стоимость 1 кВт·ч электроэнергии принят авторами 5 руб.

Стоимость одного элемента стандарта 8040 (40 м² мембран) составляет в среднем 50 000 руб. Доза ингибитора, дозируемого в исходную воду для предотвращения образования осадка карбоната кальция, составляет 10 г/м³ воды, поступающей в установку. При использовании мембран 70 NE на начальной стадии очистки требуется дозирование ингибитора в количестве 3–5 г/м³ исходной

воды. Расход исходной воды, а также пермеатов и концентратов, полученных на первой и второй стадиях очистки, представлены в балансовых схемах, которые можно увидеть на рис. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная технология предусматривает применение двух или трех ступеней очистки воды с использованием на каждой ступени низкоселективных нанофильтрационных мембран для предотвращения образования осадков карбоната кальция в мембранных аппаратах и минимизации эксплуатационных затрат.

Использование нанофильтрационных мембран на каждом этапе очистки в мембранной установке предотвращает образование отложений карбоната кальция в мембранных аппаратах и исключает необходимость применения ингибиторов и моющих растворов, что существенно снижает эксплуатационные расходы.

Разработанная двух- или трехступенчатая схема применения мембран также позволяет регулировать качество и ионный состав очищенной воды. При этом применение трехступенчатой схемы дает возможность эффективно производить одновременную подготовку питьевой воды, воды для горячего водоснабжения и химочищенной воды для подпитки водогрейных котлов.

Анализ экономической эффективности предложенной технологии демонстрирует, что, несмотря на рост числа мембранных компонентов в системе, общие затраты на эксплуатацию мембранной установки значительно уменьшаются. Это достигается благодаря сокращению расходов на химические реагенты и утилизацию концентрата в канализацию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ventresque C., Gisclon V., Bablon G., Chagneau G.* An outstanding feat of modern technology: the Mery-sur-Oise nanofiltration Treatment plant (340,000 m³/d) // *Desalination*. 2000. Vol. 131. Issues 1–3. Pp. 1–16. DOI: 10.1016/S0011-9164(00)90001-8

2. *Wang X., Hu R., Wei J., Huang T., Li K., Cheng H.* Experimental study on softening high-calcium sulfate reverse osmosis concentrate using induced crystallization method // *Water*. 2024. Vol. 17. Issue 1. P. 4. DOI: 10.3390/W17010004

3. *Suratt W.B., Andrews D.R., Pujals V.J., Richards S.A.* Design considerations for major membrane treatment facility for groundwater // *Desalination*. 2000. Vol. 131. Issue 1–3. Pp. 37–46. DOI: 10.1016/S0011-9164(00)90004-3

4. *Lopes C.N., Petrus J.C.C., Riella H.G.* Color and COD retention by nanofiltration membranes // *Desalination*. 2005. Vol. 172. Issue 1. Pp. 77–83. DOI: 10.1016/j.desal.2004.07.030

5. *Бабаев А.В., Подковыров В.П., Доможалов Д.И., Арутюнова И.Ю., Ягунков С.Ю.* Повторное использование сливной воды, образующейся при обработке водопроводного осадка // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2010. № 10–1. С. 20–26. EDN MVRESH.

6. *Wilf M., Aerts P., Bartels C., Bloxom D., Christopher J., Festger A. et al.* The Guidebook to Membrane Technology for Wastewater Reclamation. Balaban Publishers, 2010. 788 p.

7. *Abdel-Fatah M.A.* Nanofiltration systems and applications in wastewater treatment : review article // *Ain Shams Engineering Journal*. 2018. Vol. 9. Issue 4. Pp. 3077–3092. DOI: 10.1016/j.asej.2018.08.001

8. *Turek M., Mitko K., Skóra P., Dydo P., Jakóbi-Kolon A., Warzecha A. et al.* Improving the Performance of a Salt Production Plant by Using Nanofiltration as a Pretreatment // *Membranes*. 2022. Vol. 12. Issue 12. P. 1191. DOI: 10.3390/membranes12121191

9. *Lopes C.N., Petrus J.C.C., Riella H.G.* Color and COD retention by nanofiltration membranes // *Desalination*. 2005. Vol. 172. Issue 1. Pp. 77–83. DOI: 10.1016/j.desal.2004.07.030

10. *Ribeiro R.M., Bergamasco R., Gimenes M.L.* Membranes synthesis study for colour removal of a textile effluent // *Desalination*. 2002. Vol. 145. Issue 1–3. Pp. 61–63. DOI: 10.1016/S0011-9164(02)00368-5

11. *Ahmed M.A., Amin S., Mohamed A.A.* Fouling in reverse osmosis membranes: monitoring, characterization, mitigation strategies and future directions // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. Issue 4. P. e14908. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14908

12. *Quist-Jensen C.A., Sørensen J.M., Svenstrup A., Scarpa L., Carlsen T.S., Jensen H.C. et al.* Membrane crystallization for phosphorus recovery and ammonia stripping from reject water from sludge dewatering process // *Desalination*. 2018. Vol. 440. Pp. 156–160. DOI: 10.1016/j.desal.2017.11.034

13. *Джубари М.К., Алексеева Н.В.* Технологии обратного осмоса при очистке промышленных сточных вод: состояние проблемы и борьба с обрастанием мембран // *Южно-Сибирский научный вестник*. 2021. № 2 (36). С. 60–70. DOI: 10.25699/SSSB.2021.36.2.020. EDN IOUHND.

14. *Иркешев Н.С., Власова А.Ю.* Исследование твердых отложений на обратноосмотических мембранах водоподготовительных установок // *Инновационная наука*. 2024. № 7–1. С. 29–35. EDN AWCQJM.

15. *Халиков Р.М., Иванова О.В.* Эффективные мембранные технологии для подготовки качественной питьевой воды // *European Research : сб. ст. XIV Междунар. науч.-практ. конф.* 2018. С. 89–92. EDN YRWITD.

16. *Громов С.Л., Пантелеев А.А.* Современные технологии водоподготовки как средство снижения эксплуатационных расходов // *Энергетик*. 2012. № 10. С. 15–18. EDN PEZHIF.

17. *Спицов Д.В., Андрианов А.П.* Совершенствование конструкции мембранных аппаратов с целью сокращения эксплуатационных затрат при эксплуатации мембранных установок // *Успехи современной науки*. 2017. Т. 4. № 2. С. 41–44. EDN YGXEMZ.

18. *Первов А.Г., Рудакова Г.Я., Ефремов Р.В.* Разработка программ для технологического расчета систем обратного осмоса и нанофильтрации с использованием реагентов «Аминат» // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2009. № 7. С. 21–28. EDN KVOGRV.

19. *Головесов В.А., Рудакова Г.Я., Первов А.Г., Спицов Д.В.* Выбор мембран и сервисных реагентов для мембранных установок, применяемых для обработки подземных вод // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 11. С. 1556–1569. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1556-1569

20. *Горбунова Т.П., Андрианов А.П.* Разработка малоотходных технологий очистки природных вод на основе нанофильтрации и обратного осмоса // *Водоочистка*. 2013. № 1. С. 30–36. EDN PUMIAT.

Поступила в редакцию 15 февраля 2025 г.

Принята в доработанном виде 10 марта 2025 г.

Одобрена для публикации 22 мая 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Алексей Германович Первов** — доктор технических наук, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2671-6352, РИНЦ ID: 168126, Scopus: 6603768203, ResearcherID: R-8851-2016, ORCID: 0000-0002-7518-2342; ale-pervov@yandex.ru;

Дмитрий Владимирович Спицов — кандидат технических наук, доцент, директор института Инженерно-экологического строительства и механизации; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5240-5133, РИНЦ ID: 531559, Scopus: 57194449123, ResearcherID: AAC-2402-2022, ORCID: 0000-0001-6252-9485; spitsovdv@mgsu.ru;

Тет Зо Аунг — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7295-4279; newmoon68109@gmail.com;

Анна Сергеевна Кулагина — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2500-4062; anya.k.11@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ventresque C., Gisclon V., Bablon G., Chagneau G. An outstanding feat of modern technology: the Mery-sur-Oise nanofiltration Treatment plant (340,000 m³/d). *Desalination*. 2000; 131(1-3):1-16. DOI: 10.1016/S0011-9164(00)90001-8
2. Wang X., Hu R., Wei J., Huang T., Li K., Cheng H. Experimental study on softening high-calcium sulfate reverse osmosis concentrate using induced crystallization method. *Water*. 2024; 17(1):4. DOI: 10.3390/W17010004
3. Suratt W.B., Andrews D.R., Pujals V.J., Richards S.A. Design considerations for major membrane treatment facility for groundwater. *Desalination*. 2000; 131(1-3):37-46. DOI: 10.1016/S0011-9164(00)90004-3
4. Lopes C.N., Petrus J.C.C., Riella H.G. Color and COD retention by nanofiltration membranes. *Desalination*. 2005; 172(1):77-83. DOI: 10.1016/j.desal.2004.07.030
5. Babaev A.V., Podkovyrov V.P., Domozhakov D.I., Arutyunova I.Yu., Yagunkov S.Yu. Reuse of waste water generated during the treatment of tap sludge. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2010; 10-1:20-26. EDN MVRESH. (rus.).
6. Wilf M., Aerts P., Bartels C., Bloxom D., Christopher J., Festger A. et al. *The Guidebook to Membrane Technology for Wastewater Reclamation*. Balaban Publishers, 2010; 788.
7. Abdel-Fatah M.A. Nanofiltration systems and applications in wastewater treatment: Review article. *Ain Shams Engineering Journal*. 2018; 9(4):3077-3092. DOI: 10.1016/j.asej.2018.08.001
8. Turek M., Mitko K., Skóra P., Dydo P., Jakóbik-Kolon A., Warzecha A. et al. Improving the Performance of a Salt Production Plant by Using Nanofiltration as a Pretreatment. *Membranes*. 2022; 12(12):1191. DOI: 10.3390/membranes12121191
9. Lopes C.N., Petrus J.C.C., Riella H.G. Color and COD retention by nanofiltration membranes. *Desalination*. 2005; 172(1):77-83. DOI: 10.1016/j.desal.2004.07.030
10. Ribeiro R.M., Bergamasco R., Gimenes M.L. Membranes synthesis study for colour removal of a textile effluent. *Desalination*. 2002; 145(1-3):61-63. DOI: 10.1016/S0011-9164(02)00368-5
11. Ahmed M.A., Amin S., Mohamed A.A. Fouling in reverse osmosis membranes: monitoring, characterization, mitigation strategies and future directions. *Heliyon*. 2023; 9(4):e14908. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14908
12. Quist-Jensen C.A., Sørensen J.M., Svenstrup A., Scarpa L., Carlsen T.S., Jensen H.C. et al. Membrane crystallization for phosphorus recovery and ammonia stripping from reject water from sludge dewatering process. *Desalination*. 2018; 440:156-160. DOI: 10.1016/j.desal.2017.11.034
13. Gubari M.Q., Alekseeva N.V. Reverse osmosis technologies for industrial wastewater treatment: state of the problem and control of membrane fouling. *South-Siberian Scientific Bulletin*. 2021; 2(36):60-70. DOI: 10.25699/SSSB.2021.36.2.020. EDN IOUHND. (rus.).
14. Irkeshev N.S., Vlasova A.Yu. Study of solid deposits on reverse osmosis membranes of water treatment plants. *Innovation Science*. 2024; 7-1:29-35. EDN AWCQJM. (rus.).
15. Khalikov R.M., Ivanova O.V. Effective membrane technologies for production of quality drinking-water. *European Research : collection of articles from the XIV International Scientific and Practical Conference*. 2018; 89-92. EDN YRWITD. (rus.).
16. Gromov S.L., Panteleev A.A. Modern water treatment technologies as a means of reducing operating costs. *Energetik*. 2012; 10:15-18. EDN PEZHIF. (rus.).
17. Spitsov D.V., Andrianov A.P. Improving the design of membrane devices in order to reduce operating costs during operation of membrane installations. *Advances in Modern Science*. 2017; 4(2):41-44. EDN YGXEMZ. (rus.).
18. Pervov A.G., Rudakova G.Ya., Efremov R.V. Development of programs for technological calculation of reverse osmosis and nanofiltration systems using “Aminat” reagents. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2009; 7:21-28. EDN KVOGRV. (rus.).
19. Golovesov V.A., Rudakova G.Ya., Pervov A.G., Spitsov D.V. The choice of membranes and reagents designated for membrane systems used to treat ground water. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(11):1556-1569. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1556-1569 (rus.).
20. Gorbunova T.P., Andrianov A.P. Development of low-waste technologies for natural water purification based on nanofiltration and reverse osmosis. *Water Purification*. 2013; 1:30-36. EDN PUMIAT. (rus.).

Received February 15, 2025.

Adopted in revised form on March 10, 2025.

Approved for publication on May 22, 2025.

BIONOTES: Alexei G. Pervov — Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2671-6352, ID RSCI: 168126, Scopus: 6603768203, ResearcherID: R-8851-2016, ORCID: 0000-0002-7518-2342; ale-pervov@yandex.ru;

Dmitriy V. Spitsov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Engineering and Ecological Construction and Mechanization; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 5240-5133, ID RSCI: 531559, Scopus: 57194449123, ResearcherID: AAC-2402-2022, ORCID: 0000-0001-6252-9485; spitsovdv@mgsu.ru;

Htet Zow Aung — postgraduate student of the Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 7295-4279; newmoon68109@gmail.com;

Anna S. Kulagina — postgraduate student of the Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2500-4062; anya.k.11@yandex.ru.

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

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 697.11

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1373-1385

Математическая модель процесса потокораспределения в инженерных системах здания

Никита Юрьевич Саввин*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);
г. Белгород, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях современного строительства, где требования к энергоэффективности и устойчивости растут с каждым годом, необходимость в интегрированном подходе к моделированию субъектов инженерных систем (ИС) становится особенно актуальной.

Материалы и методы. Для разработки математической модели жизненного цикла (ЖЦ) ИС здания использовался способ составления замкнутого ориентированного графа. Проведена математическая и графическая обработка полученных результатов.

Результаты. Представлен подход к моделированию процессов деградации и восстановления ИС, учитывающий зависимость от времени и текущего состояния для снижения затрат на текущий и плановые ремонты. Установлена взаимосвязь каждой ИС как полноценного комплекса. Выявлены проблемы, оказывающие влияние на работоспособность ИС зданий. Для моделирования динамики изменения производительности системы предложен коэффициент, учитывающий мгновенное ухудшение и постепенное ухудшение $K_{уш}$. Приведено практическое прогнозирование результатов исследования на ЖЦ комплекса ИС объекта капитального строительства.

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы с целью проектирования ИС здания и оценки их функциональности на протяжении всего ЖЦ здания. Разработана математическая модель потокораспределения в ИС здания. Предложен уникальный коэффициент, учитывающий вероятность возникновения различного типа негативных воздействий. В перспективе предложенная система позволит отказаться от расчета ежегодных ожидаемых убытков, вызванных опасностями, и вместо этого сосредоточиться на оценке совокупного воздействия нескольких опасностей в контексте жизненного цикла инженерных систем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: математическая модель, инженерные системы, проектирование, оптимизация, устойчивое развитие, коэффициент ущерба, программный комплекс, жизненный цикл

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Саввин Н.Ю. Математическая модель процесса потокораспределения в инженерных системах здания // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 9. С. 1373–1385. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1373-1385

Автор, ответственный за переписку: Никита Юрьевич Саввин, n-savvin@mail.ru.

Mathematical model of the flow distribution process in building engineering systems

Nikita Yu. Savvin*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov);
Belgorod, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. In the context of modern construction, where the requirements for energy efficiency and sustainability are growing every year, the need for an integrated approach to modelling the subjects of engineering systems is becoming especially relevant.

Materials and methods. To develop a mathematical model of the life cycle of building engineering systems, a method for compiling a closed directed graph was used. Mathematical and graphical processing of the obtained results was carried out.

Results. An approach to modelling the processes of degradation and restoration of engineering systems is presented, taking into account the dependence on time and the current state to reduce the costs of routine and scheduled repairs. The relationship of each engineering system as a full-fledged complex is established. Problems affecting the operability of building engineering systems are identified. In order to model the dynamics of system performance change, a coefficient considering instantaneous deterioration and gradual deterioration C_{loss} is proposed. A practical forecast of the research results for the life cycle of a complex of engineering systems of a capital construction project is presented.

Conclusions. The obtained results can be used to design building engineering systems and assess their functionality throughout the entire life cycle of the building. A mathematical model of flow distribution in the engineering systems of the building was developed. A unique coefficient is proposed that takes into account the probability of occurrence of various types of negative impacts. In the future, the proposed system will allow to abandon the calculation of annual expected losses caused by hazards and instead focus on assessing the combined impact of several hazards in the context of the life cycle of engineering systems.

KEYWORDS: mathematical model, engineering systems, design, optimization, sustainable development, damage coefficient, software package, life cycle

FOR CITATION: Savvin N.Yu. Mathematical model of the flow distribution process in building engineering systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(9):1373-1385. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1373-1385 (rus.).

Corresponding author: Nikita Yu. Savvin, n-savvin@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых факторов социально-экономического прогресса страны является гарантированное предоставление социальных услуг, включая жилищно-коммунальные. К ним относятся водоснабжение (горячее и холодное), теплоснабжение, электроснабжение и другое. Требования к качеству предоставления жилищно-коммунальных услуг установлены на высоком уровне. Для их выполнения следует обеспечить не только необходимую прочность конструкций зданий и сооружений, но и бесперебойную работу инженерных систем (ИС). С целью надежной и безопасной эксплуатации объектов требуется осуществлять постоянный мониторинг технического состояния ИС [1, 2].

Согласно данным, представленным в статье [3], средний уровень физического износа коммунальной инфраструктуры в стране имеет существенные значения: котельных — 55 %, сетей водопровода — 65 %, канализации и тепловых сетей — 63 %, электрических сетей — 58 %, водопроводных насосных станций — 65 %, канализационных насосных станций — 57 %, очистных сооружений водопровода — 54 % и канализации — 56 %. В отдельных муниципальных образованиях степень износа коммунальной инфраструктуры достигает 70–80 % и ежегодно увеличивается на 2–3 %. Приблизительно 30 % основных фондов коммунального хозяйства полностью исчерпали свой нормативный срок службы. Это обстоятельство затрудняет планирование и реализацию необходимых мероприятий по технической эксплуатации объектов ИС и конструкций зданий и сооружений. Своевременное принятие мер позволит прогнозировать оставшийся ресурс каждого объекта и предотвратить достижение им критического состояния.

Современное строительство все больше характеризуется цифровизацией каждого этапа жизненного цикла (ЖЦ) объекта капитального строительства (ОКС). Распространение данных и услуг создает возможности для реализации самоорганизующихся, адаптивных и частично автономных гибких производственных систем, что особенно важно в условиях сокращения ЖЦ продукции и ее растущей вариативности [4, 5]. В результате повышаются эффективность и устойчивость производства, например, за счет минимизации времени переналадок и оптимизации использования ресурсов и энергии [6]. Учитывая эти тенденции, производственные системы становятся более сложными, поскольку состоят из множества взаимосвязанных компонентов. Для эффективного управления такой сложностью

все большее значение приобретает концепция цифрового двойника, представляющего собой виртуальную копию ОКС.

В статье [7] рассматривается классический метод оценки изношенности элементов здания. В работе В.А. Соколова [8] предложено разделение технического состояния элементов ОКС на пять категорий с соответствующей вероятностью. Такой подход дает возможность прогнозировать вероятность появления негативных событий в конструкциях. Предложена модель идентификации причин возникновения дефектов строительных конструкций различного типа [9]. Один из основных элементов модели — база нечетких знаний для определенных типов дефектов конструкций зданий и сооружений, при формировании которой применяются знания и опыт строителей-экспертов. Коллективом исследователей предлагается генетический алгоритм, осуществляющий связь между реальными причинами появления дефектов на этапе ЖЦ — эксплуатация и результатами принятия решений системой [10]. Предлагается унифицировать инженерные задачи, позволяющее многие виды работ выполнять параллельно, интегративно, тем самым сокращая время производства [11]. В данном контексте труд [12] представляет интерес тем, что каждая отдельная модель обеспечивает возможность повторного использования репозитория моделей одного проекта в других проектах. Такой подход удобен при рассмотрении эволюции одной инженерной системы, но вызовет коллизии при проектировании комплекса систем. Аналогичные исследования приведены в работах [13–16], они сфокусированы на отдельных составляющих инженерной системы. Для решения указанной проблемы необходимо применение технологии информационного моделирования (Building Information Modeling — BIM) на каждом этапе ЖЦ ОКС с мониторингом функциональности ИС. В прошедшие годы появилось множество определений этой концепции [17, 18]. В работе [19] используется определение, расширяющее базовые данные модели и взаимосвязи за счет возможностей имитации, активного сбора сведений и синхронизации. Особый интерес представляет цикл публикаций [20–23], посвященных разработке цифрового двойника для существующих ИС производственного назначения. Эти труды объединяет наличие постоянной взаимосвязи с помощью автоматизированного анализа структур информационной модели в различных состояниях и представление их в общей базе данных на основе графов.

Однако эти исследования, как правило, имеют частный индивидуальный подход, учитывают инфраструктуру конкретного региона или страны и неприменимы для других условий эксплуатации. Кроме того, в большинстве работ получены обобщенные результаты, которые не рассматривают полноценную комплексную систему и разработку методики по снижению воздействия негативных воздействий на функциональность ИС здания. Следовательно, актуальна разработка математической модели ЖЦ инженерных систем здания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При проектировании инженерной инфраструктуры первостепенное значение имеет обеспечение ее функциональной целесообразности. Постоянный рост числа потребителей и изменение их характеристик приводят к увеличению требований к системам жизнеобеспечения и, как следствие, к трансформации критериев их эксплуатации и управления. Управляемыми параметрами инженерных сетей являются характеристики и конфигурация отдельных подсистем (газоснабжение, водоснабжение, электроснабжение, канализация и другое). Регулирование параметров и структуры возможно посредством воздействия на активные элементы и распределительные сети. Об изменениях в параметрах и структуре потребителей можно судить по динамике показателей потребления энергоресурсов [24].

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к анализу последствий на протяжении всего жизненного цикла (Life Cycle Consequence analysis — LCCA) [25–27]. В условиях многочисленных угроз данный анализ может стать важным

инструментом для принятия эффективных и взвешенных решений. Он позволяет минимизировать риски и повысить производительность критически важных объектов, что, в свою очередь, способствует снижению потенциального ущерба и усилению их устойчивости за счет повышения способности противостоять сбоям. Кроме того, LCCA дает возможность оценить воздействие ремонтных работ на участок сети. Для построения математической модели необходимо установить взаимосвязь с каждой инженерной системой.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основная цель оперативного управления инженерными сетями заключается в адаптации структуры и параметров управляемых подсистем для компенсации изменений в структуре и параметрах потребителей. При этом компенсация должна осуществляться с минимальными потерями, которые могут быть выражены в энергетических, стоимостных или надежных показателях, при строгом соблюдении соответствующих ограничений. На рис. 1 представлена структура процесса оперативного управления потокораспределением в инженерных сетях.

Потокораспределение в ИС зданий — это критически важный аспект проектирования, который обеспечивает эффективное распределение ресурсов, таких как энергия, воздух, вода и другие. Эффективное управление потоками в таких системах требует использования математических моделей и алгоритмов, способных учитывать множество взаимодействующих переменных в реальном времени. Одним из наиболее эффективных подходов к этой задаче служит применение замкнутых ориентированных



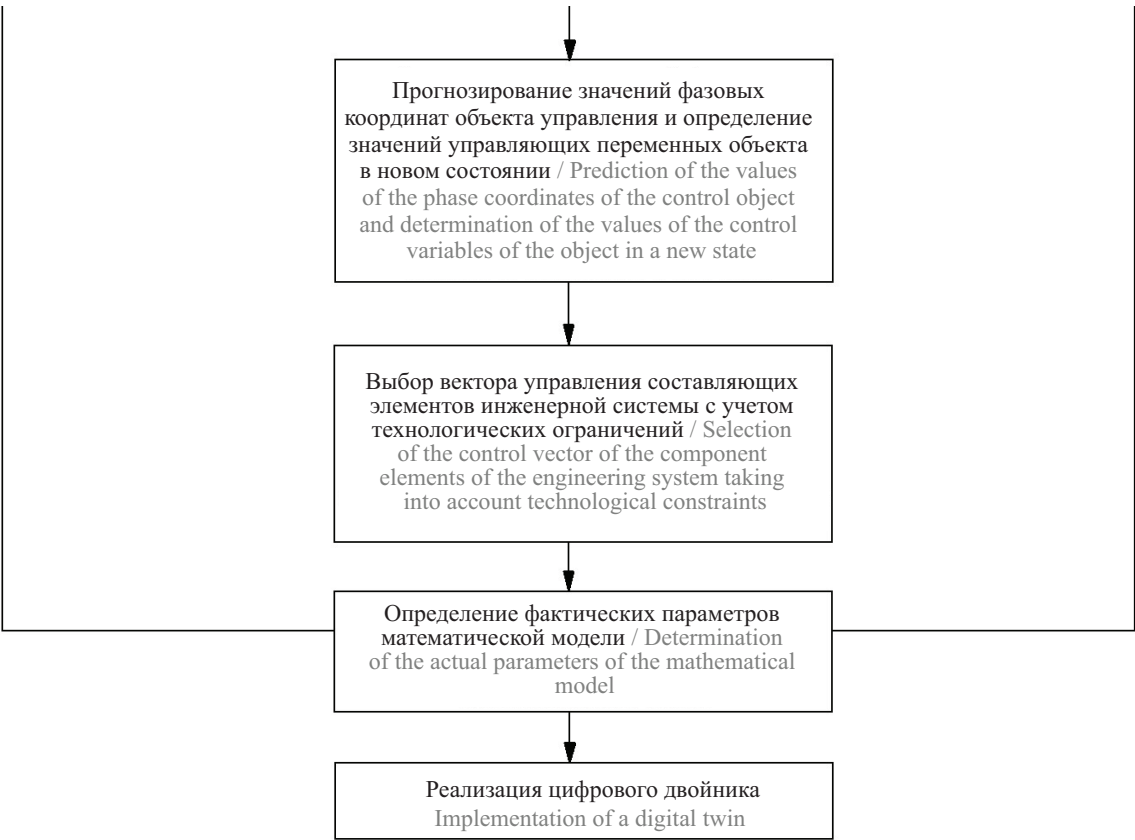


Рис. 1. Структура процесса оперативного управления потокораспределением в инженерных сетях
Fig. 1. Structure of the process of operational management of flow distribution in engineering networks

графов, которые визуализируют процессы распределения потоков. Структура управления инженерными системами построена на двух основных этапах.

Первый этап посвящен планированию распределения потоков энергоносителей. При этом учитывается доминирующее влияние некоторых факторов в определенный период времени. Оптимальным решением на этом этапе является достижение максимального объема подачи энергоносителей при одно-временной минимизации эксплуатационных затрат.

Второй этап направлен на стабилизацию всех (в идеальном случае) или подавляющего большинства фазовых параметров объекта (давление, температура, расход и т.д.). Эта стабилизация должна обеспечить минимальное отклонение этих параметров от расчетных или плановых значений.

Процесс потокораспределения в ИС можно представить в виде математической модели с учетом следующих начальных и граничных условий:

1. Инженерная система здания представляет собой сложную интегрированную систему, включающую множество взаимосвязанных параметров трех основных типов: потребители, источники и линии связи.
2. Каждая система i характеризуется двумя зависящими друг от друга динамически изменяемыми величинами: мощностью потребления q_i и мощностью потерь Q_i с учетом ряда допущений и направ-

ления движения. Потери мощности представляют собой разность мощностей всего технологического оборудования и затраченной мощности.

3. К источникам газо-, водо- и электроснабжения относятся, соответственно, компрессорные, насосные и трансформаторные станции.
4. Линии связи, обеспечивающие передачу энергоносителей между источниками и потребителями, включают трубопроводы, кабельные линии, вентиляционные шахты и другое. Важный аспект функционирования системы — зависимость потерь мощности от уровня потребления: с увеличением потребления потери также возрастают.
5. Потребители (нагрузка для электроэнергии) представляют собой участки, потребляющие различные типы энергоносителей.
6. При моделировании ИС здания необходимо учитывать характер взаимодействия между каждым элементом.
7. Общий объем энергоносителей, поступающих в систему, должен быть равен суммарному объему, потребляемому всеми потребителями.

Таким образом, можно записать в векторной форме мощность потребления q_i и мощность потерь Q_i для количества систем, равных $i = 1, \dots, n$:

$$\vec{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n); \tag{1}$$

$$\vec{Q} = (Q_1, Q_2, \dots, Q_n). \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) формируют математическую модель, которая отражает взаимосвязь между параметрами и структурой системы потокораспределения. Ввиду высокой степени взаимосвязанности участков в современных инженерных сетях для обеспечения их согласованной работы требуется опора на данную модель. Подобная задача корреляции всех компонентов ИС не может быть решена без применения специализированного программного обеспечения.

Инженерную систему здания можно описать математически с помощью связанного ориентированного графа, представленного на рис. 2.

Цель составления орграфа — оценка приведенных энергозатрат для обеспечения безопасного и стабильного функционирования комплекса всех ИС здания.

Граф построен на основе теоретико-графового представления взаимосвязей между элементами ИС здания. Составление ориентированного графа базируется на общепринятых стандартах и правилах проектирования инженерных систем (рис. 3), определяющих структуру взаимосвязей внутри ИС зданий.

На любом участке представленного графа имеются местные сопротивления. Поэтому с учетом их выражение расчета зависимости $Q_i(q_i)$ будет иметь вид:

$$Q_i(q_i) = \sum_{j=1}^{m_i} Q_{ij}^n(q_i) - \sum_{j=1}^{n_i} Q_{ij}^a(q_i) \quad (3)$$

при

$$i = 1, \dots, n, \quad (4)$$

где Q_{ij}^n и Q_{ij}^a — связанные переменные j -го участка i -й ветви; m_i — количество линий связи; n_i — количество подсистем.

Следовательно, суммарная переменная, определяемая всеми параметрами i -й ветви, выражается формулой:

$$Q_i^n(q_i) = \sum_{j=1}^{m_i} Q_{ij}^n(q_i). \quad (5)$$

Для удобства выполним аппроксимацию выражения (5) с учетом местных сопротивлений и, поскольку все процессы динамически изменяемые, с учетом коэффициента нелинейности получим:

$$Q_{ij}^n = \text{sgn} q_{ij} r_{ij} |q_{ij}|^{\kappa_{ij}}, \quad (6)$$

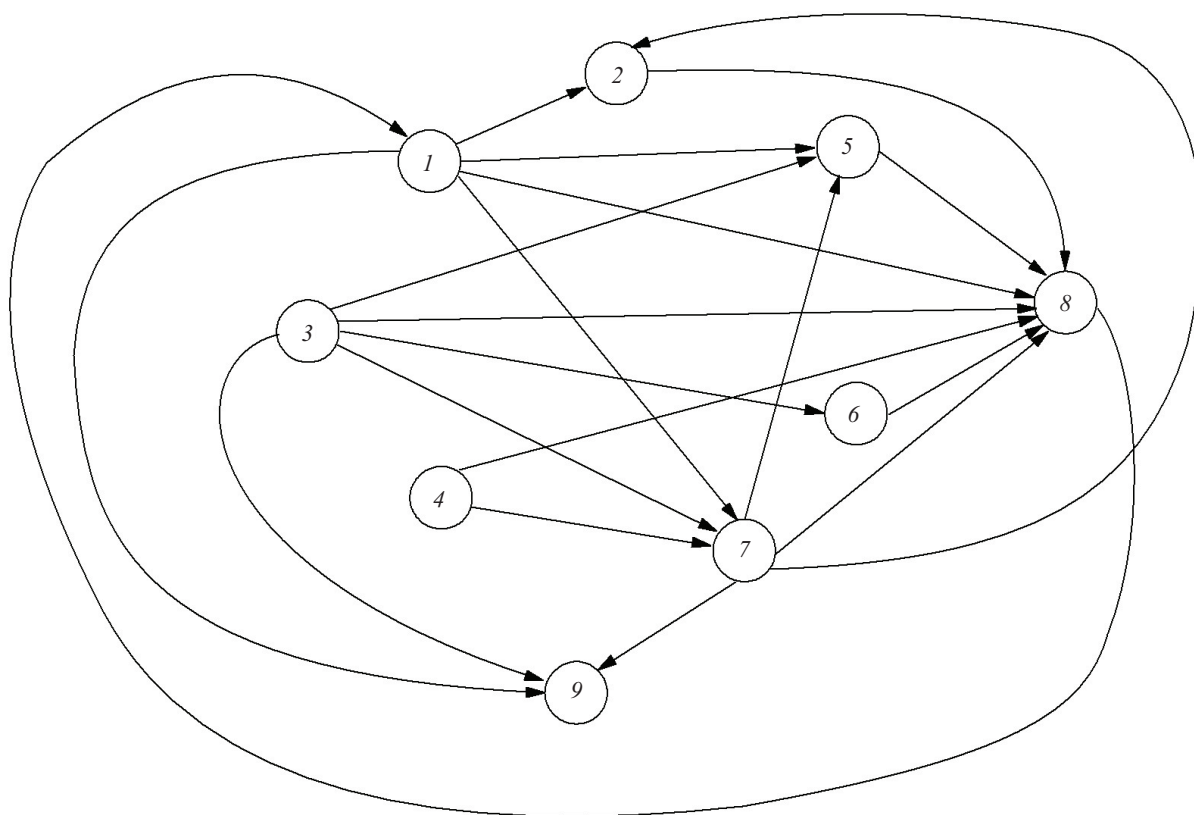


Рис. 2. Связный ориентированный граф (оргграф) инженерных систем здания: 1 — электроэнергия; 2 — вентиляция; 3 — водоснабжение; 4 — газоснабжение; 5 — кондиционирование; 6 — водоотведение; 7 — теплоснабжение; 8 — системы безопасности; 9 — отопление

Fig. 2. Connected directed graph of building engineering systems: 1 — electric power; 2 — ventilation; 3 — water supply; 4 — gas supply; 5 — air conditioning; 6 — water disposal; 7 — heat supply; 8 — security systems; 9 — heating

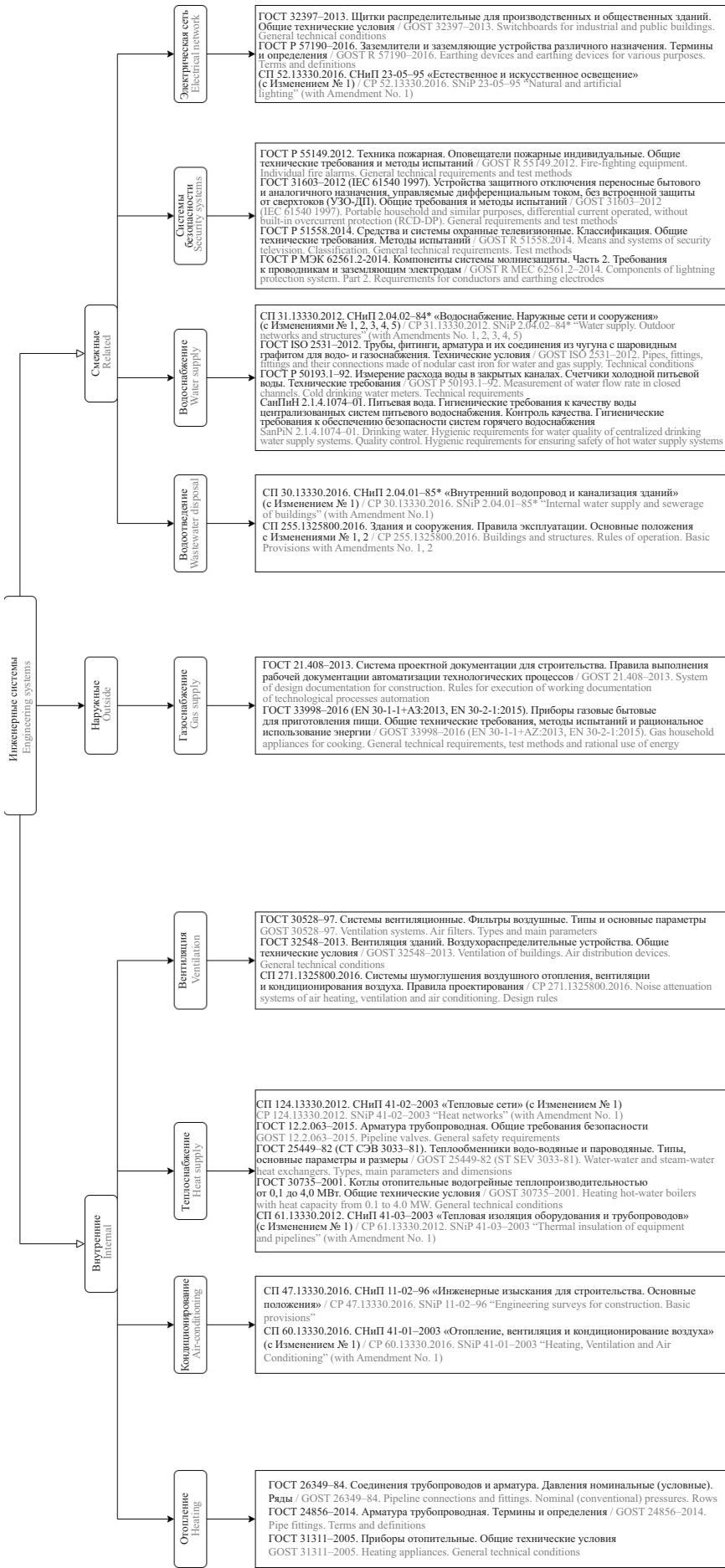


Рис. 3. Классификация инженерных систем здания
Fig. 3. Classification of building engineering systems

где $r_{ij} > 0$ и $\kappa_{ij} \geq 1$ — коэффициент местного сопротивления и коэффициент нелинейности j -го участка i -й ветви. Данные коэффициенты определяются с помощью компьютерного моделирования с корректировкой на экспериментальные результаты.

Таким образом, предложенные уравнения отражают взаимосвязь между параметрами, переменными и геометрической структурой сети, а также лежат в основе анализа и синтеза сетей.

В реальных условиях эксплуатации ИС здания имеются известные параметры объемов потребления и технологические параметры участков (диаметр трубопроводов, протяженность, сечение проводов, материал коммуникаций и т.д.), с помощью которых синтез сети сводится к определению векторов последовательной и параллельной переменной. В свою очередь, определение этих переменных напрямую зависит от решения математической модели с учетом внешних возмущений в системе нелинейных уравнений:

$$f_{\omega} = \sum_{j=1}^{m_{\omega}} Q_{\omega j}^n(q_{\omega}) - \sum_{i=1}^{n_r} h_{\omega j}^a(q_{\omega}) + \sum_{i=v}^e b_{\omega i} \left(\sum_{j=1}^{m_i} Q_{ij}^n(q_i) - \sum_{j=1}^{n_i} Q_{ij}^a(q_i) \right), \quad (7)$$

где ω — какое-либо по счету внешнее возмущение с учетом $\omega = v, \dots, e$; $b_{\omega i}$ — коэффициент какого-либо внешнего возмущения в i -й ветви.

Температурные изменения учтены путем введения поправочных коэффициентов, характеризующих зависимость потерь мощности от температуры. Изменения температуры влияют на теплопроводность материалов, электрическое сопротивление проводников и гидравлическое сопротивление трубопроводных магистралей. Эти эффекты учитываются введением коэффициента $b_{\omega i}$, рассчитываемые с использованием компьютерных моделей и уточняемые на основе экспериментальных данных.

Особый интерес представляет оценка достоверности графа с точки зрения электроцепей. Ориентированные графы соответствуют стандартам электротехнических расчетов, например, эквивалентные схемы замещения для расчета токов короткого замыкания, падения напряжения и перегрузок. Параметры электрической нагрузки (мощности и сопротивления) рассчитываются согласно паспортным характеристикам оборудования и измерениям реальной работы систем. В настоящем исследовании применяется принцип укрупненного представления электрической системы, где каждая ветвь включает суммарные величины мощности и сопротивления, характерные для всей группы подключенных устройств.

Параметры, такие как мощность и сопротивление, представлены как средние величины по каждому участку инженерной системы. Процесс усреднения осуществляется путем деления общего

потока мощности на количество параллельных ветвей или последовательно соединенных элементов, входящих в одну линию связи. Формулы (5), (6) используют среднее арифметическое значение для аппроксимации и приведения графика зависимостей к виду, удобному для практических расчетов.

Зачастую при решении нелинейной системы уравнений получается несколько корней. В условиях неравномерного распределения энергоносителей, линейности уравнений связи и того, что расход теплоносителей всегда положителен в нормальном режиме работы, решение всегда будет иметь единственный корень.

В случаях, когда $f_{\omega} = 0$, инженерная система находится в одной из двух стадий ЖЦ — проектирование или утилизация.

В области моделирования факторов, влияющих на работоспособность ИС зданий, актуальны следующие общие проблемы:

1. Отсутствие единой терминологии. Описания взаимодействий опасных событий в основном носят качественный характер, что затрудняет формализацию и стандартизацию подходов к их анализу.

2. Недостаток количественных методов оценки последствий. Существующие методы не всегда полностью учитывают специфику взаимодействия различных типов опасностей и их воздействие на компоненты инженерных систем.

3. Высокая вычислительная сложность. Использование рекурсивных аналитических формул для учета усугубления последствий при взаимодействии опасных событий может потребовать значительных вычислительных ресурсов, особенно в случаях частых событий в ограниченные промежутки времени.

4. Неполное моделирование процессов восстановления. Текущие исследования ремонта объектов сосредоточены на функциональном восстановлении, не учитывая взаимосвязь между мгновенным и постепенным разрушением и ремонтом.

5. Отсутствие универсального подхода к сравнению последствий. В настоящее время для сравнения последствий различных опасных событий часто используется экспертная оценка, которая не всегда гарантирует объективность и воспроизводимость результатов.

Таким образом, требуется разработка инновационных методов и подходов, направленных на преодоление существующих ограничений и обеспечение более точной и надежной оценки рисков, связанных с взаимодействием опасных событий.

Для решения этой задачи предлагается интегрировать в методологии расчета коэффициент ущерба $K_{\text{ущ}}$. Коэффициент ущерба в ЖЦ ИС здания отражает взаимозависимость между воздействием различных факторов на эксплуатацию и состояние этих систем на протяжении всего срока их службы. Другими словами, коэффициент ущерба количе-

ственно определяет степень повреждений или снижения функциональности инженерной системы.

Постоянная эволюция среды, функционирование которой обеспечивается инженерными сетями, влечет за собой изменение параметров и случайного характера процессов потребления энергетических ресурсов в этих сетях. В связи с этим для получения прогнозов с минимальной ошибкой требуется применение адаптивных алгоритмов, позволяющих формировать модель, адекватно отражающую исследуемый процесс на каждом этапе вычисления прогноза. Следовательно, возникает необходимость разработки методики оценки состояния ИС в конкретный момент времени, т.е. осуществления мониторинга их работоспособности в течение всего срока службы. Для этого следует определить коэффициент ущерба в числовом выражении. Он представляет собой сумму произведений вероятностей возникновения негативных событий, затрагивающих целостность функционирования системы на любом участке инженерной сети. Формула для его нахождения выглядит следующим образом:

$$K_{\text{ущ}}(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \cdot B_i(t) \cdot C_i(t) \cdot D_i(t), \tag{8}$$

где $A_i(t)$ — вероятность возникновения аварийной ситуации вследствие негативного воздействия окружающей среды; $B_i(t)$ — вероятность установки бракованного оборудования из выпущенной партии; $C_i(t)$ — вероятность осуществления некачественного ремонта, повлекшего нарушение целостности оборудования или сокращение его производительности; $D_i(t)$ — вероятность возникновения аварийной ситуации в результате непредвиденных обстоятельств (человеческий фактор).

Необходимые вероятности определяются из официальных отчетов соответствующих министерств ЖКХ, энергетики или отчетов страховых компаний.

Рассмотрим практическое применение на примере реального объекта — Центральной областной библиотеки г. Белгорода для иллюстрации аналитической методики оценки ЖЦ инженерной системы, подверженной воздействию нескольких опасных

факторов. При расчете суммарного ожидаемого ущерба для такой системы необходимо учитывать взаимодействие всех опасных факторов в течение всего срока службы. Для этого предлагается арифметическое суммирование ожидаемых последствий от воздействия каждого фактора с учетом коэффициента ущерба. Расчет эффективного срока службы системы производится по формуле:

$$E = \sum_{i=1}^{\infty} P(i, T) \sum_{j=1}^i P(K_{\text{ущ}}), \tag{9}$$

где P — производительность, т. у. т.; i — случайный фактор, воздействующий на какой-либо участок инженерной сети; j — участок инженерной системы.

В свою очередь, производительность инженерной системы определяется как:

$$P = \frac{S}{Z}, \tag{10}$$

где S — количество энергии, необходимое для поддержания функционирования комплекса инженерных систем здания, Дж; Z — общие затраты в процессе эксплуатации инженерных систем, руб.

На рис. 4 представлена схема, демонстрирующая влияние многочисленных опасных факторов на характеристики ИС. Схема показывает снижение и восстановление характеристик с учетом как коэффициента ущерба, так и без его учета.

Предложенный графический метод анализа воздействия факторов на ИС здания опирается на стохастический марковский процесс с дискретными состояниями и временем. Такой подход позволяет оценить вероятность нахождения системы в каждом из возможных состояний работоспособности после каждого негативного события. Полученные вероятностные оценки могут быть интегрированы с моделями системных последствий, что даст возможность определить последствия воздействия на систему в любой момент времени в течение всего срока ее эксплуатации.

Финальным этапом является разработка алгоритма (рис. 5), обеспечивающего бесперебойную цикличность процесса потокораспределения в ин-

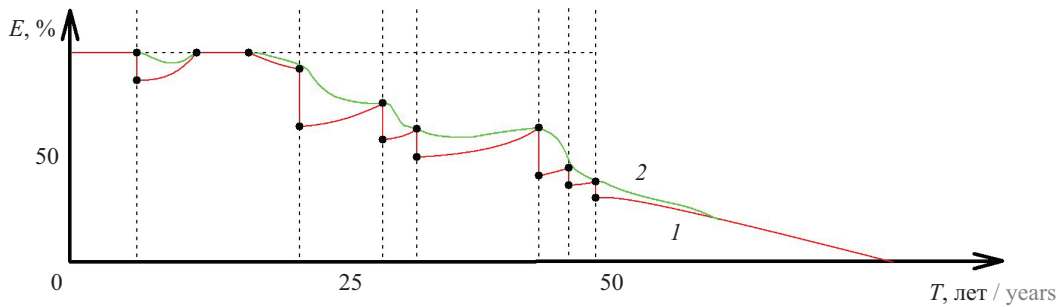


Рис. 4. Жизненный цикл инженерных систем здания: 1 — без учета коэффициента ущерба; 2 — с учетом коэффициента ущерба

Fig. 4. Life cycle of building engineering systems: 1 — without taking into account the damage coefficient; 2 — taking into account the damage coefficient

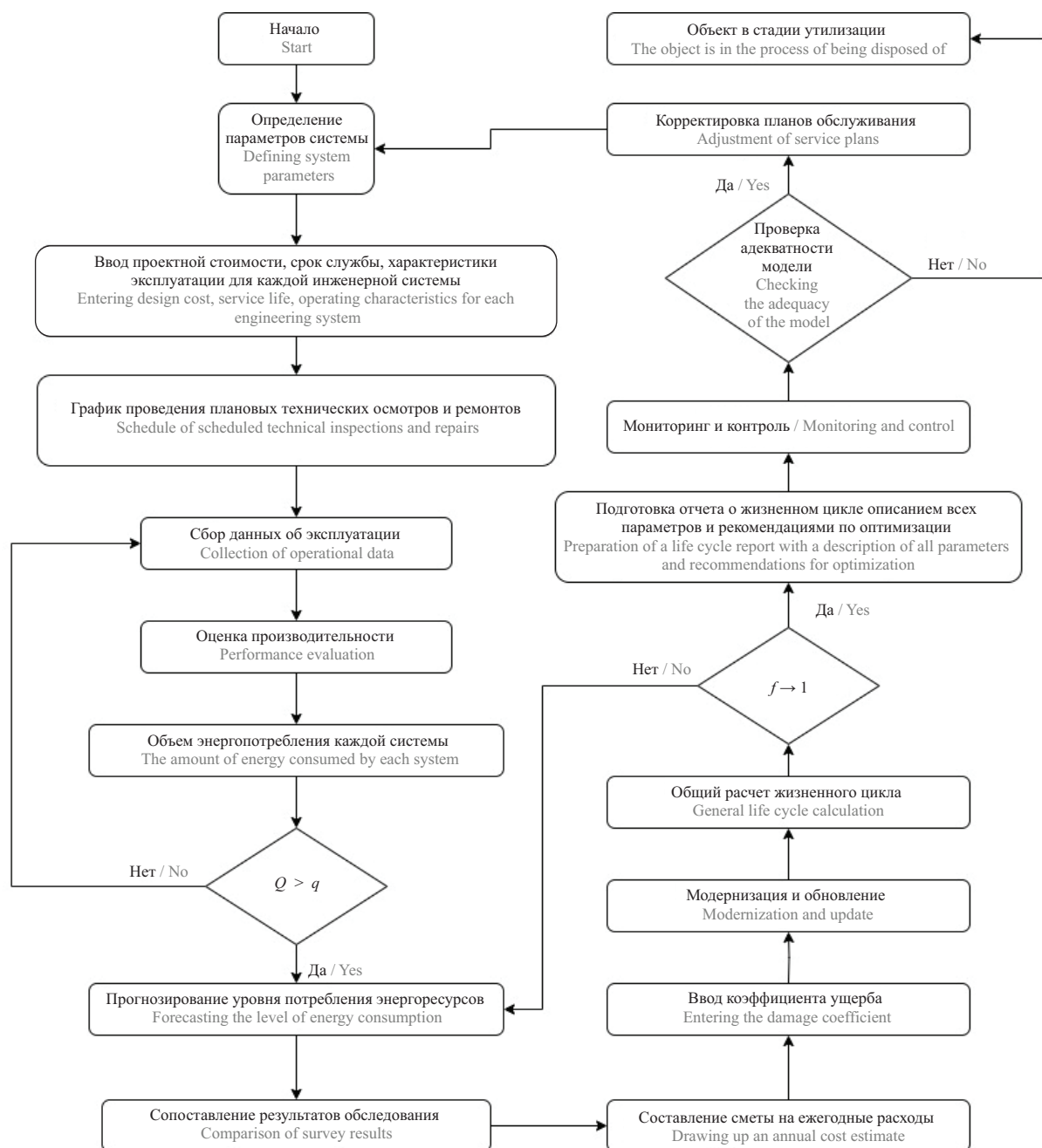


Рис. 5. Алгоритм жизненного цикла работы инженерных систем

Fig. 5. Algorithm of the life cycle of engineering systems

женерных системах здания, т.е. решение оргграфа, изображенного на рис. 2.

Приведенный график (рис. 5) представляет собой обобщенную модель, демонстрирующую динамику функционирования ИС во времени. При оценке затрат на восстановление после чрезвычайных ситуаций целесообразно применять точную шкалу, основанную на степени воздействия на работоспособность и восстановительные возможности системы. В подобных случаях система может быть классифицирована по уровням функциональности, от полной работоспособности до полного выхода из строя.

Применение замкнутых ориентированных графов в моделировании потокораспределения в ИС зданий значительно упрощает процесс проектирования и повышения эффективности работы систем. Разработанный алгоритм может использоваться для решения ключевых задач и оптимизации процессов, что позволит достигать высоких уровней надежности и эффективности в управлении инженерными системами. Исследование в данной области предоставляет возможности для дальнейших разработок и совершенствования технологий, направленных на устойчивое использование ресурсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного исследования обоснована актуальность разработки математической модели процесса потокораспределения в ИС на протяжении всего ЖЦ. С помощью предлагаемого подхода снижается уровень неопределенности при планировании эксплуатационных воздействий на здания и сооружения, а также создаются предпосылки автоматизации сложной логической обработки экспериментальных и экспертных данных.

Предложенные зависимости обеспечивают эффективное моделирование процессов деградации и восстановления состояния ИС с учетом временного фактора и текущего состояния. При этом вычислительные затраты существенно снижаются по сравнению с существующими методами. Ключевым достоинством рассмотренной математической модели является учет сложных взаимосвязей между различными типами опасностей. Она позволяет оценить последствия постепенного улучшения состояния инженерных систем в результате ремонтных работ, а также учитывать неопределенности, свя-

занные с взаимодействием процессов износа и восстановления в различных состояниях оборудования и линий связи. Это принципиальное преимущество по сравнению с имеющимися методологиями, которые не учитывают подобные неопределенности.

В долгосрочной перспективе предложенная система позволит отказаться от расчета ежегодных ожидаемых убытков, вызванных опасностями, и сосредоточиться на оценке комплексного воздействия множества опасностей в контексте ЖЦ ИС.

Благодаря своей гибкости модель может быть адаптирована для оптимизации стратегий управления рисками до возникновения событий для различных критически важных объектов, которые сталкиваются с повторяющимися разными опасностями в течение длительного периода принятия решений. Таким образом, она обеспечивает системный подход к оценке рисков, который может быть использован для обоснования управленческих решений на протяжении всего ЖЦ ИС. Данный подход может найти практическое применение в компаниях, на балансе которых имеются здания и сооружения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Michalski W. Critiques of life cycle assessment. Worcester Polytechnic Institute, 2015.
2. Taheri-Rad A., Khojastehpour M., Rohani A., Khoramdel S., Nikkhah A. Energy flow modeling and predicting the yield of Iranian paddy cultivars using artificial neural networks // *Energy*. 2017. Vol. 135. Pp. 405–412. DOI: 10.1016/j.energy.2017.06.089
3. Солдатенко Т.Н. Модель остаточного ресурса инженерных систем с высоким уровнем износа // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 6 (32). С. 64–72. DOI: 10.5862/MCE.32.10. EDN PDZKGZ.
4. Galasso C., McCloskey J., Pelling M., Hope M., Bean C.J., Cremen G. et al. Editorial. Risk-based, Pro-poor Urban Design and Planning for Tomorrow's Cities // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2021. Vol. 58. P. 102158. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2021.102158
5. Cremen G., Galasso C., McCloskey J. Modelling and quantifying tomorrow's risks from natural hazards // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 817. P. 152552. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152552
6. Gill J.C., Malamud B.D. Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards // *Reviews of Geophysics*. 2014. Vol. 52. Issue 4. Pp. 680–722. DOI: 10.1002/2013RG000445
7. Уткин В.С., Уткин Л.В. Экспертный метод определения физического износа зданий // *Промышленное и гражданское строительство*. 2000. № 1. С. 48. EDN ZEXRXH.
8. Соколов В.А. Построение решения для оценки технического состояния конструктивных систем зданий и сооружений с использованием вероятност-

ных методов распознавания // *Инженерно-строительный журнал*. 2010. № 6 (16). С. 48–57. EDN MWNNMH.

9. Солдатенко Т.Н. Модель идентификации и прогноза дефектов строительной конструкции на основе результатов ее обследования // *Инженерно-строительный журнал*. 2011. № 7 (25). С. 52–61. EDN OIYPSP.

10. Shtovba S., Rotshtein A., Pankevich O. Fuzzy Rule Based System for Diagnosis of Stone Construction Cracks of Buildings // *International Series in Intelligent Technologies*. 2002. Pp. 401–411. DOI: 10.1007/978-94-010-0324-7_28

11. Гарина Е.П., Коробова Я.В., Цыбуцкина И.Е., Писарева В.А. Методические основы формирования организационно-экономических систем на примере отдельного проекта // *Экономика и предпринимательство*. 2025. № 2 (175). С. 1287–1290. DOI: 10.34925/EIP.2025.175.2.238. EDN IFXLIC.

12. Сухомлин В.А., Гапанович Д.А. Эталонная модель модельно-ориентированной системной и программной инженерии (model-based systems and software engineering — MBSSE) и ее связь с процессными стандартами системной инженерии // *International Journal of Open Information Technologies*. 2024. Т. 12. № 1. С. 144–155. EDN PURCDJ.

13. Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В. Реинжиниринг организационной структуры и бизнес-процессов инвестиционно-строительной деятельности. Их место в общей системе корпоративного регулирования // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. № 2. С. 294–306.

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.294-306. EDN IELZVM.

14. Ковалев С.П. Применение цифровых двойников в автоматизированном управлении высокотехнологичным промышленным производством // Мехатроника, автоматизация, управление. 2024. Т. 25. № 4. С. 211–220. DOI: 10.17587/mau.25.211-220. EDN AUJZZK.

15. Лосев Ю.Г., Лосев К.Ю. Целостность и иерархичность структур данных в жизненном цикле объектов малоэтажного жилищного строительства // Строительство и архитектура. 2024. Т. 12. № 1 (42). С. 4. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-12-1-4-4. EDN GNBOEP.

16. Дорошин И.Н., Халиулина О.В., Якупова Ю.М. Управление проектами промышленных и гражданских объектов на основе технологий информационного моделирования // Перспективы науки. 2024. № 1 (172). С. 122–126. EDN JYFQZP.

17. Sjarov M., Lechler T., Fuchs J., Brossog M., Selmaier A., Faltus F. et al. The Digital Twin Concept in Industry — A Review and Systematization // 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). 2020. Pp. 1789–1796. DOI: 10.1109/etfa46521.2020.9212089

18. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 11. Pp. 939–948. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.198

19. Talkhestani B.A., Jung T., Lindemann B., Sahlab N., Jazdi N., Schloegl W. et al. An architecture of an intelligent digital twin in a cyber-physical production system // At — Automatisierungstechnik. 2019. Vol. 67. Issue 9. Pp. 762–782. DOI: 10.1515/auto-2019-0039

20. Braun D., Riedhammer M., Jazdi N., Schloegl W., Weyrich M. A methodology for the detection of functional relations of mechatronic components and assemblies in brownfield systems // Procedia CIRP. 2022. Vol. 107. Pp. 119–124. DOI: 10.1016/j.procir.2022.04.020

21. Talkhestani B.A., Braun D., Schloegl W., Weyrich M. Qualitative and quantitative evaluation of reconfiguring an automation system using Digital Twin // Procedia CIRP. 2020. Vol. 93. Pp. 268–273. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.014

22. Jazdi N., Talkhestani B.A., Maschler B., Weyrich M. Realization of AI-enhanced industrial automation systems using intelligent Digital Twins // Procedia CIRP. 2021. Vol. 97. Pp. 396–400. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.257

23. Hermann F., Chen B., Ghasemi G., Stegmaier V., Ackermann T., Reimann P. et al. A digital twin approach for the prediction of the geometry of single tracks produced by laser metal deposition // Procedia CIRP. 2022. Vol. 107. Pp. 83–88. DOI: 10.1016/j.procir.2022.04.014

24. Серая Д.С., Козыренко Н.Е. Новаторство в современной архитектуре // Новые идеи нового века : мат. Междунар. науч. конф. ФАД ТОГУ. 2013. Т. 2. С. 152–158. EDN QCUXPD.

25. Fonseca D.J., Navaresse D.O., Moynihan G.P. Simulation metamodeling through artificial neural networks // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2003. Vol. 16. Issue 3. Pp. 177–183. DOI: 10.1016/S0952-1976(03)00043-5

26. Akiyama M., Frangopol D.M., Ishibashi H. Toward life-cycle reliability-, risk- and resilience-based design and assessment of bridges and bridge networks under independent and interacting hazards: emphasis on earthquake, tsunami and corrosion // Structure and Infrastructure Engineering. 2020. Vol. 16. Issue 1. Pp. 26–50. DOI: 10.1080/15732479.2019.1604770

27. Саввин Н.Ю., Гарбузов Д.Д. Исследование эффективности охлаждения пластинчатого теплообменника конденсатора промышленной холодильной машины при различных скоростях вращения вентиляторов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. № 10. С. 42–56. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-42-56. EDN FLWLIB.

Поступила в редакцию 5 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 5 июня 2025 г.

Одобрена для публикации 25 июня 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **Никита Юрьевич Саввин** — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 1108836, Scopus: 57219992792, ResearcherID: AAR-3129-2021, ORCID: 0000-0001-6379-6825; n-savvin@mail.

REFERENCES

1. Michalski W. *Critiques of life cycle assessment*. Worcester Polytechnic Institute, 2015. (rus.).
2. Taheri-Rad A., Khojastehpour M., Rohani A., Khoramdel S., Nikkhah A. Energy flow modeling and predicting the yield of Iranian paddy cultivars using artificial neural networks. *Energy*. 2017; 135:405-412. DOI: 10.1016/j.energy.2017.06.089
3. Soldatenko T.N. Model of the residual life of engineering systems with a high level of wear. *Magazine of Civil Engineering*. 2012; 6(32):64-72. DOI: 10.5862/MCE.32.10. EDN PDZKGZ. (rus.).
4. Galasso C., McCloskey J., Pelling M., Hope M., Bean C.J., Cremen G. et al. Editorial. Risk-based, Pro-poor Urban Design and Planning for Tomorrow's Cities. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2021; 58:102158. DOI: 10.1016/j.ijdr.2021.102158
5. Cremen G., Galasso C., McCloskey J. Modelling and quantifying tomorrow's risks from natural hazards. *Science of The Total Environment*. 2022; 817:152552. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152552
6. Gill J.C., Malamud B.D. Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards. *Reviews of Geophysics*. 2014; 52(4):680-722. DOI: 10.1002/2013RG000445
7. Utkin V.S., Utkin L.V. Expert method for determining the physical deterioration of buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2000; 1:48. EDN ZEXRXH. (rus.).
8. Sokolov V.A. Construction of a solution for assessing the technical condition of structural systems of buildings and structures using probabilistic recognition methods. *Magazine of Civil Engineering*. 2010; 6(16):48-57. EDN MWNNMH. (rus.).
9. Soldatenko T.N. Model for identification and prediction of defects in a building structure based on the results of its inspection. *Magazine of Civil Engineering*. 2011; 7(25):52-61. EDN OIYPSP. (rus.).
10. Shtovba S., Rotshtein A., Pankevich O. Fuzzy Rule Based System for Diagnosis of Stone Construction Cracks of Buildings. *International Series in Intelligent Technologies*. 2002; 401-411. DOI: 10.1007/978-94-010-0324-7_28
11. Garina E.P., Korobova Y.V., Tsybutsinina I.E., Pisareva V.A. Methodological foundations for the formation of organizational and economic systems using the example of a separate project. *Economy and Entrepreneurship*. 2025; 2(175):1287-1290. DOI: 10.34925/EIP.2025.175.2.238. EDN IFXLIC. (rus.).
12. Sukhomlin V.A., Gapanovich D.A. Model-based systems and software engineering (MBSSE) reference model and its relationship to systems engineering process standards. *International Journal of Open Information Technologies*. 2024; 12(1):144-155. EDN PURCDJ. (rus.).
13. Sborshikov S.B., Lazareva N.V. Reengineering of the organizational structure and business processes of investment and construction activities. Their place in the general system of corporate regulation. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(2):294-306. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.294-306. EDN IELZVM. (rus.).
14. Kovalyov S.P. Leveraging digital twin in automated high-tech production management. *Mechatronics, Automation, Control*. 2024; 25(4):211-220. DOI: 10.17587/mau.25.211-220. EDN AUJZZK. (rus.).
15. Losev Yu., Losev K. Integrity and hierarchy of data structures in the life cycle of low-rise housing construction. *Construction and Architecture*. 2024; 12(1):42:4. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-12-1-4-4. EDN GNBOEP. (rus.).
16. Doroshin I.N., Khaliulina O.V., Yakupova Yu.M. Project management of industrial and civil facilities based on information modeling technologies. *Science Prospects*. 2024; 1(172):122-126. EDN JYFQZP. (rus.).
17. Sjarov M., Lechler T., Fuchs J., Brossog M., Selmaier A., Faltus F. et al. The Digital Twin Concept in Industry — A Review and Systematization. *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. 2020; 1789-1796. DOI: 10.1109/etfa46521.2020.9212089
18. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*. 2017; 11:939-948. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.198
19. Talkhestani B.A., Jung T., Lindemann B., Sahlab N., Jazdi N., Schloegl W. et al. An architecture of an intelligent digital twin in a cyber-physical production system. *At — Automatisierungstechnik*. 2019; 67(9):762-782. DOI: 10.1515/auto-2019-0039
20. Braun D., Riedhammer M., Jazdi N., Schloegl W., Weyrich M. A methodology for the detection of functional relations of mechatronic components and assemblies in brownfield systems. *Procedia CIRP*. 2022; 107:119-124. DOI: 10.1016/j.procir.2022.04.020
21. Talkhestani B.A., Braun D., Schloegl W., Weyrich M. Qualitative and quantitative evaluation of reconfiguring an automation system using Digital Twin. *Procedia CIRP*. 2020; 93:268-273. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.014
22. Jazdi N., Talkhestani B.A., Maschler B., Weyrich M. Realization of AI-enhanced industrial automation systems using intelligent Digital Twins. *Procedia CIRP*. 2021; 97:396-400. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.257
23. Hermann F., Chen B., Ghasemi G., Stegmair V., Ackermann T., Reimann P. et al. A digital twin approach for the prediction of the geometry of single tracks produced by laser metal deposition. *Procedia CIRP*. 2022; 107:83-88. DOI: 10.1016/j.procir.2022.04.014

24. Seraya D., Kozyrenko N. *Innovation in modern architecture. New ideas of the new century : materials of the international scientific conference of the FAD PNU*. 2013; 2:152-158. EDN QCUXPD. (rus.).

25. Fonseca D.J., Navarrese D.O., Moynihan G.P. Simulation metamodeling through artificial neural networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2003; 16(3):177-183. DOI: 10.1016/S0952-1976(03)00043-5

26. Akiyama M., Frangopol D.M., Ishibashi H. Toward life-cycle reliability-, risk- and resilience-based

design and assessment of bridges and bridge networks under independent and interacting hazards: emphasis on earthquake, tsunami and corrosion. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2020; 16(1):26-50. DOI: 10.1080/15732479.2019.1604770

27. Savvin N., Garbuzov D. Investigation of the cooling efficiency of the plate heat exchanger of the condenser of an industrial refrigeration machine at different fan speeds. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2023; 10:42-56. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-42-56. EDN FLWLIB. (rus.).

Received March 5, 2025.

Adopted in revised form on June 5, 2025.

Approved for publication on June 25, 2025.

B I O N O T E S: **Nikita Yu. Savvin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 1108836, Scopus: 57219992792, ResearcherID: AAR-3129-2021, ORCID: 0000-0001-6379-6825; n-savvin@mail.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 332.85

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1386-1400

Средние цены на рынке жилья Москвы: анализ динамики и прогнозы

Эльвира Юрьевна Чурилова

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Приводятся результаты анализа динамики средних цен на жилье первичного и вторичного рынков в г. Москве за период 2010–2024 гг. в разрезе типов квартир различного качества (среднего, улучшенного и элитного), а также прогноз цен 1 м² квартир на квартальные периоды 2025–2027 гг.

Материалы и методы. Исследование базируется на официальных данных Росстата с 2010 по 2024 г. Для прогнозирования использовались модели экспоненциального сглаживания Винтерса с учетом линейного тренда и аддитивной сезонности.

Результаты. Среднегодовые темпы прироста цен на жилье в г. Москве за период 2010–2024 гг. составили: по всем типам квартир на 4,8 % на вторичном рынке и на 6,5 % на первичном; по квартирам среднего качества (типовым) на 5,3 % на вторичном рынке и 7,1 % на первичном; по квартирам улучшенного качества на 4,8 % на вторичном рынке и 8,1 % на первичном; по элитным квартирам на 6,5 % на вторичном рынке и на 6,2 % на первичном. Согласно полученным прогнозам на вторичном рынке жилья прирост средних цен на 1 м² в г. Москве по всем типам квартир по отношению к концу 2024 г. может составить 2,5 % в конце 2025 г., 5,3 % в конце 2026 г., 8,2 % в конце 2027 г.; на первичном рынке — 6,7 % в конце 2025 г., 11,3 % в конце 2026 г., 15,9 % в конце 2027 г. по отношению к аналогичному показателю 2024 г.

Выводы. При сохранении тенденций 2010–2024 гг. наибольший рост цен ожидается на элитное жилье вторичного рынка, наименьший — на квартиры среднего и улучшенного качества также вторичного рынка жилья.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рынок жилья, цена 1 м² квартир, прогнозы цен на жилье, эконометрическое моделирование, модели Винтерса, жилищное строительство, недвижимость в Москве

Благодарности. Автор выражает благодарность анонимным рецензентам за проделанную работу, сделанные замечания и дополнения.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чурилова Э.Ю. Средние цены на рынке жилья Москвы: анализ динамики и прогнозы // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 9. С. 1386–1400. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1386-1400

Автор, ответственный за переписку: Эльвира Юрьевна Чурилова, EChurilova@fa.ru.

Average prices in the Moscow housing market: analysis of dynamics and forecasts

Elvira Yu. Churilova

Financial University under the Government of the Russian Federation; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The author analyzes average price changes in primary and secondary segments of the Moscow housing market, spanning from 2010 to 2024, with a breakdown into mediocre, better-quality, and luxury apartments, and presents price projections for quarterly periods of 2025–2027 per square meter of apartment space.

Materials and methods. The study is backed by the official data available from the Federal Service of State Statistics and covering the period of 2010–2024. Winter's exponential smoothing models were applied to make projections that encompassed linear trends and additive seasonality.

Results. In 2010–2024, the average annual price growth rate was 4.8 % for all types of apartments on the secondary Moscow market, and 6.5 % for all types of apartments on the primary Moscow market. As for "mediocre quality" (standard) apartments, the average annual price growth rate was 5.3 % for the secondary market and 7.1 % for the primary market. As for better-quality apartments, the average annual price growth rate was 4.8 % for the secondary market and 8.1 % for the primary market. As for luxury apartments, average annual price growth rates were 6.5 % for the secondary market and 6.2 % for the primary market. The author's projections for the secondary housing market suggest a 2.5 % increase in the average price per square meter of all types of Moscow apartments as of the year-end 2025 relative to the year-end 2024. The same value will reach 5.3 % as of the year-end 2026, and 8.2 % as of the year-end 2027. For the primary market,

the author suggests a 6.7 % price increase as of the year-end 2025; a 11.3 % price increase as of the year-end 2026, and a 15.9 % price increase as of the year-end 2027 relative to the same value for 2024.

Conclusions. If the same trends persist, the greatest price growth rate is anticipated for luxury housing on the secondary housing market, and the smallest price growth rate is projected for mediocre and better-quality apartments on the secondary housing market.

KEYWORDS: housing market, price per square meter of apartment, housing price projections, econometric modeling, Winter's models, housing construction, Moscow real estate

Acknowledgements. The author expresses gratitude to anonymous reviewers for their efforts, comments and revisions.

FOR CITATION: Churilova E.Yu. Average prices in the Moscow housing market: analysis of dynamics and forecasts. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(9):1386-1400. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1386-1400 (rus.).

Corresponding author: Elvira Yu. Churilova, EChurilova@fa.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Рынок жилья является одним из важных элементов рыночной экономики. Его положение также отражает текущее положение социальной сферы. Увеличение объемов строительства и степени доступности жилья решающим образом влияет на общий уровень жизни населения. Цена 1 м² жилья зависит от сбалансированности показателей спроса и предложения, а также от множества других факторов, включая текущую производительность труда, удельные затраты на строительство 1 м² жилья, инфляцию в стране и т.д.

Анализом сегодняшнего состояния рынка жилья занимались многие специалисты в сфере недвижимости, аналитики и ученые. Так, вопросы конкуренции на современном российском рынке жилой недвижимости рассмотрены в работе Е.Ю. Васильевой [1]. Эконометрическое моделирование цен на рынке новостроек Москвы на основе множественной регрессионной модели описано Д.А. Пяткиной [2]. О проблемах ценообразования на рынке московской жилой недвижимости писали Г.И. Гончаров [3] и др. В.М. Четвериковым [4] дан сравнительный статистический анализ изменения средних цен предложения жилья. Исследованиям вторичного рынка жилья Москвы посвящены работы А.И. Косякина [5] и других авторов. Платежеспособный спрос и уровень доступности жилья изучала Ю.Н. Богданова [6]. Тенденции в развитии рынка жилья приведены в трудах Е.В. Мальцевой [7], Д.А. Дорожкина [8], С.И. Белякова [9], П.М. Петровой [10] и др. В статье М.О. Мамедли [11] рассматриваются эконометрические подходы к оценке стоимости недвижимости на основе больших данных. Проблемы моделирования оценки стоимости жилой недвижимости также исследовали Т.К. Богданова [12], Е.Ж. Голубев [13] и др. Обзор инструментов повышения платежеспособного спроса дала в своей работе Ж.А. Хоркина [14]. В.П. Грахов [15] показал, каким образом можно определить дату в динамических рядах, после которой наступают существенные структурные сдвиги стоимости строительства. О доступности жилья как современной проблеме России писала А.Н. Лозовская [16]. Осо-

бенности формирования комплексного ценностного предложения на рынке жилья Москвы рассмотрел А.С. Осипов [17]. Оценивание рынка недвижимости России представлено в статье Е.Д. Ивкова [18]. Развитие инвестиционно-строительного рынка Москвы и Московской области изучено в публикации М.О. Столярчук [19].

Исследованиями рынка жилья активно занимаются и зарубежные специалисты. Так, Д. Граватт [20] анализируются долгосрочные мировые тенденции ценообразования. Статья Г. Милунович [21] посвящена прогнозированию индекса цен на жилье в Австралии. Каким образом пандемия COVID-19 повлияла на доступность жилья в США проанализировал Б. Берейтшафт [22]. Проблемы доступности жилья для населения также затронул в своей работе С. Уилл [23]. Связь между ростом цен на жилье и объемами сбережений населения рассмотрел П.Л. Йоргенсен [24]. М. Куроки [25] показал влияние иммиграции рабочей силы в США на цены на жилье и аренду. Связь между финансовой политикой и ценами на недвижимость изучил П.А. Гандре [26]. Циклы роста и спада цен на жилье в США описал С. Кейнс [27]. Исследованием цен на жилье в США занимался также З. Макгерк [28].

Несмотря на то что рынок жилья в настоящее время достаточно изучен, своевременный анализ динамики и прогнозирование цен на жилье имеют важное значение для оценки состояния социальной сферы и уровня жизни населения. Как известно, Россия имеет определенные демографические проблемы, связанные с низкой рождаемостью. Доступность жилья напрямую влияет на уровень жизни населения, выступает одним из факторов, влияющих на рождаемость. Данное обстоятельство определяет актуальность изучения рынка жилья. Перед данным исследованием были поставлены цели проанализировать динамику цен на жилье в г. Москве за период 2010–2024 гг. и дать прогнозы цен на три последующих года. В связи с этим в ходе исследования решены следующие задачи:

- подготовлен статистический обзор динамики квартальных цен на первичное и вторичное жилье по разным типам квартир за период 2010–2024 гг.;

- исследованы разные классы моделей временных рядов на их пригодность для прогнозирования средних цен на 1 м² жилья;
- рассчитаны прогнозные значения средних цен на 1 м² жилья по разному типу квартир первичного и вторичного рынков жилья на квартальные периоды 2025–2027 гг.;
- сделаны выводы по полученным результатам анализа и прогнозам.

Научная новизна и практическая ценность исследования заключаются в полученной методике построения прогнозов средних цен на жилье.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основе исследования лежат квартальные данные Росстата по средним ценам 1 м² общей площади квартир на рынке первичного и вторичного жилья в г. Москве с 2010 по 2024 г.¹

После рассмотрения разного класса моделей для прогнозирования временных рядов были окончательно отобраны эконометрические модели Винтерса тройного экспоненциального сглаживания с учетом линейного тренда и аддитивной сезонности с лагом, равным 4 квартальным периодам, следующего вида:

$$\begin{aligned} F_t &= \alpha \cdot (X_t - S_{t-p}) + (1 - \alpha) \cdot (F_{t-1} + T_{t-1}); \\ T_t &= \gamma \cdot (F_t - F_{t-1}) + (1 - \gamma) \cdot T_{t-1}; \\ S_t &= \delta \cdot (X_t - F_t) + (1 - \delta) \cdot S_{t-p}; \\ W_{t+m} &= F_t + m \cdot T_t + S_t, \end{aligned}$$

где F_t — прогнозное значение на период t (сглаженное значение для периода $(t - 1)$); X_t — текущее значение временного ряда; α — параметр сглаживания (фактор демпфирования); T_t — оценка тренда; γ — параметр сглаживания для оценки тренда; S_t — оценка сезонной компоненты; δ — параметр сезонного сглаживания; p — лаг сезонности; W_{t+m} — прогноз на период $(t + m)$; m — период, на который осуществляется прогноз.

Построение моделей осуществлялось в пакете STATISTICA. Качество моделей определялось

¹ Средняя цена 1 кв. м общей площади квартир на рынке жилья // ЕМИСС. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/31452>

на основе расчета средней ошибки аппроксимации по формуле:

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}}{n} \cdot 100 \%,$$

где y_i — фактические значения уровней временного ряда; $\hat{y}_i$ — значения уровней временного ряда, рассчитанные по модели; n — число уровней временного ряда ($i = 1, \dots, n$).

Качественная интерпретация средней ошибки аппроксимации происходила по следующей шкале: 0–5 % — «отличное», от 6–10 % — «хорошее», от 10–15 % — «допустимое», свыше 15 % — «низкое» качество модели. У полученных моделей ошибка находилась в пределах 2,4–6,4 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ и прогноз цен на жилье в г. Москве выполнили по следующим показателям:

- средняя цена 1 м² квартир на вторичном рынке жилья;
- средняя цена 1 м² квартир среднего качества (типовых) на вторичном рынке жилья;
- средняя цена 1 м² квартир улучшенного качества на вторичном рынке жилья;
- средняя цена 1 м² элитных квартир на вторичном рынке жилья;
- средняя цена 1 м² квартир на первичном рынке жилья;
- средняя цена 1 м² квартир среднего качества (типовых) на первичном рынке жилья;
- средняя цена 1 м² квартир улучшенного качества на первичном рынке жилья;
- средняя цена 1 м² элитных квартир на первичном рынке жилья.

С 2010 по 2024 г. наибольший рост цен на жилье произошел на первичном рынке: в 2,4 раза на все типы квартир, в 2,6 раза на квартиры среднего качества, в 3 раза на квартиры улучшенного качества и в 2,3 раза на элитные. Таким образом, к 2024 г. цены на 1 м² достигли 345, 264, 345 и 569 тыс. руб. соответственно (табл. 1, 2).

Табл. 1. Средние цены на жилье в г. Москве с 2010 по 2024 г.* (средняя цена 1 м², руб.)

Table 1. Average housing prices in Moscow from 2010 to 2024* (average price per square meter, rubles)

Годы Years	Вторичный рынок жилья Secondary housing market				Первичный рынок жилья Primary housing market			
	Все типы квартир All types of apartments	Квартиры среднего качества (типовые) Mediocre apartments (standard)	Улучшенного качества Better-quality apartments	Элитные квартиры Luxury apartments	Все типы квартир All types of apartments	Квартиры среднего качества (типовые) Mediocre apartments (standard)	Улучшенного качества Better-quality apartments	Элитные квартиры Luxury apartments
2010	167 312	133 966	158 502	289 600	143 066	101 229	116 144	246 104

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Годы Years	Вторичный рынок жилья Secondary housing market				Первичный рынок жилья Primary housing market			
	Все типы квартир All types of apartments	Квартиры среднего качества (типовые) Mediocre apartments (standard)	Улучшенного качества Better-quality apartments	Элитные квартиры Luxury apartments	Все типы квартир All types of apartments	Квартиры среднего качества (типовые) Mediocre apartments (standard)	Улучшенного качества Better-quality apartments	Элитные квартиры Luxury apartments
2011	163 000	140 594	160 445	263 649	127 515	99 445	139 031	219 702
2012	171 032	155 288	168 943	241 279	129 707	110 638	145 595	190 408
2013	180 529	161 375	172 532	260 349	146 413	125 942	153 403	222 742
2014	184 517	163 356	172 306	279 192	170 407	136 895	161 224	258 385
2015	190 285	164 604	182 726	321 325	175 997	127 067	154 656	303 641
2016	181 711	151 670	181 443	344 864	156 355	110 029	144 582	283 694
2017	175 474	147 746	179 532	333 040	155 218	102 313	146 488	310 369
2018	170 510	151 025	168 501	296 102	169 827	112 476	152 317	294 972
2019	180 218	158 543	178 303	256 101	195 598	144 180	164 441	290 927
2020	191 504	168 872	187 554	276 120	221 891	160 360	173 981	285 090
2021	233 894	232 343	230 573	269 174	279 344	231 557	250 205	316 298
2022	290 535	253 156	276 671	414 175	360 098	296 147	334 361	406 595
2023	315 011	258 143	322 573	503 504	315 328	230 572	293 598	506 774
2024	321 756	274 384	303 609	697 409	345 144	263 835	345 232	569 199

Примечание: * — средние цены рассчитывались на основе квартальных данных Росстата без учета физического объема продаж (невзвешенные оценки средних цен).
Note: * — average prices were calculated using quarterly data available from the Federal Service of State Statistics without taking into account the quantum of sales (unweighted estimates of average prices).

Табл. 2. Темпы роста среднедушевого дохода и средних цен на жилье в г. Москве по отношению к 2010 г. (рассчитано автором)

Table 2. Growth rates of per capita income and average housing prices in Moscow compared to 2010 (calculated by the author)

Годы Years	Темпы роста средних цен на 1 м² по отношению к 2010 г., % Average price growth rate per square meter compared to 2010, %								Темпы роста среднедушевого месячного дохода по отношению к 2010 г., % Growth rate of per capita monthly income compared to 2010, %
	Вторичный рынок жилья Secondary housing market				Первичный рынок жилья Primary housing market				
	Все типы квартир All types of apartments	Квартиры среднего качества (типовые) Mediocre apartments (standard)	Улучшенного качества Better-quality apartments	Элитные квартиры Luxury apartments	Все типы квартир All types of apartments	Квартиры среднего качества (типовые) Mediocre apartments (standard)	Улучшенного качества Better-quality apartments	Элитные квартиры Luxury apartments	
2011	97,4	104,9	101,2	91,0	89,1	98,2	119,7	89,3	107,2
2012	102,2	115,9	106,6	83,3	90,7	109,3	125,4	77,4	112,6
2013	107,9	120,5	108,9	89,9	102,3	124,4	132,1	90,5	128,1
2014	110,3	121,9	108,7	96,4	119,1	135,2	138,8	105,0	126,4
2015	113,7	122,9	115,3	111,0	123,0	125,5	133,2	123,4	137,3
2016	108,6	113,2	114,5	119,1	109,3	108,7	124,5	115,3	139,9
2017	104,9	110,3	113,3	115,0	108,5	101,1	126,1	126,1	147,1

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 9, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 9, 2025

Годы Years	Темпы роста средних цен на 1 м² по отношению к 2010 г., % Average price growth rate per square meter compared to 2010, %								Темпы роста среднедушевого месячного дохода по отношению к 2010 г., % Growth rate of per capita monthly income compared to 2010, %
	Вторичный рынок жилья Secondary housing market				Первичный рынок жилья Primary housing market				
	Все типы квартир All types of apartments	Квартиры среднего качества (типовые) Mediocre apartments (standard)	Улучшенного качества Better-quality apartments	Элитные квартиры Luxury apartments	Все типы квартир All types of apartments	Квартиры среднего качества (типовые) Mediocre apartments (standard)	Улучшенного качества Better-quality apartments	Элитные квартиры Luxury apartments	
2018	101,9	112,7	106,3	102,2	118,7	111,1	131,1	119,9	156,4
2019	107,7	118,3	112,5	88,4	136,7	142,4	141,6	118,2	169,1
2020	114,5	126,1	118,3	95,3	155,1	158,4	149,8	115,8	173,2
2021	139,8	173,4	145,5	92,9	195,3	228,7	215,4	128,5	196,3
2022	173,6	189,0	174,6	143,0	251,7	292,6	287,9	165,2	231,9
2023	188,3	192,7	203,5	173,9	220,4	227,8	252,8	205,9	265,8
2024	192,3	204,8	191,5	240,8	241,2	260,6	297,2	231,3	283,1

Табл. 3. Темпы роста среднедушевого дохода и средних цен на жилье в г. Москве по отношению к предыдущему году (рассчитано автором)

Table 3. Growth rates of per capita income and average housing prices in Moscow compared to the previous year (calculated by the author)

Годы Years	Темпы роста средних цен на 1 м² по отношению к предыдущему году, % Growth rate of average prices per square meter compared to the previous year, %								Темпы роста среднедушевого месячного дохода по отношению к предыдущему году, % Growth rate of per capita monthly income compared to the previous year, %
	Вторичный рынок жилья Secondary housing market				Первичный рынок жилья Primary housing market				
	Все типы квартир All types of apartments	Квартиры среднего качества (типовые) Mediocre apartments (standard)	Улучшенного качества Better-quality apartments	Элитные квартиры Luxury apartments	Все типы квартир All types of apartments	Квартиры среднего качества (типовые) Mediocre apartments (standard)	Улучшенного качества Better-quality apartments	Элитные квартиры Luxury apartments	
2011	97,4	104,9	101,2	91,0	89,1	98,2	119,7	89,3	107,2
2012	104,9	110,5	105,3	91,5	101,7	111,3	104,7	86,7	105,1
2013	105,6	103,9	102,1	107,9	112,9	113,8	105,4	117,0	113,7
2014	102,2	101,2	99,9	107,2	116,4	108,7	105,1	116,0	98,7
2015	103,1	100,8	106,0	115,1	103,3	92,8	95,9	117,5	108,6
2016	95,5	92,1	99,3	107,3	88,8	86,6	93,5	93,4	102,0
2017	96,6	97,4	98,9	96,6	99,3	93,0	101,3	109,4	105,1
2018	97,2	102,2	93,9	88,9	109,4	109,9	104,0	95,0	106,3
2019	105,7	105,0	105,8	86,5	115,2	128,2	108,0	98,6	108,1

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Годы Years	Темпы роста средних цен на 1 м² по отношению к предыдущему году, % Growth rate of average prices per square meter compared to the previous year, %								Темпы роста среднедушевого месячного дохода по отношению к предыдущему году, % Growth rate of per capita monthly income compared to the previous year, %
	Вторичный рынок жилья Secondary housing market				Первичный рынок жилья Primary housing market				
	Все типы квартир All types of apartments	Квартиры среднего качества (типовые) Mediocre apartments (standard)	Улучшенного качества Better-quality apartments	Элитные квартиры Luxury apartments	Все типы квартир All types of apartments	Квартиры среднего качества (типовые) Mediocre apartments (standard)	Улучшенного качества Better-quality apartments	Элитные квартиры Luxury apartments	
2020	106,3	106,5	105,2	107,8	113,4	111,2	105,8	98,0	102,5
2021	122,1	137,6	122,9	97,5	125,9	144,4	143,8	110,9	113,3
2022	124,2	109,0	120,0	153,9	128,9	127,9	133,6	128,5	118,1
2023	108,4	102,0	116,6	121,6	87,6	77,9	87,8	124,6	114,6
2024	102,1	106,3	94,1	138,5	109,5	114,4	117,6	112,3	106,5

Табл. 4. Характеристики прогнозных моделей Винтерса с линейным трендом и аддитивной сезонностью

Table 4. Characteristics of Winter’s forecast models with a linear trend and additive seasonality

Показатель Value	Значения параметров сглаживания Smoothing parameter values	Модель Model	Средняя ошибка аппрок- симации, % Average approxi- mation error, %
Средняя цена 1 м² квартир на вторичном рынке жилья Average price per square meter of apartment on the secondary housing market	$\alpha = 0,9$ $\delta = 0,1$ $\gamma = 0,2$ $SO = 162\ 000$ $TO = 2758$	$F_t = 0,9 \cdot (X_t - S_{t-4}) + 0,1 \cdot (F_{t-1} + T_{t-1});$ $T_t = 0,2 \cdot (F_t - F_{t-1}) + 0,8 \cdot T_{t-1};$ $S_t = 0,1 \cdot (X_t - F_t) + 0,9 \cdot S_{t-4}$	2,4
Средняя цена 1 м² квартир среднего качества (типовых) на вторичном рынке жилья Average price per square meter of mediocre (standard) apartment on the secondary housing market	$\alpha = 0,9$ $\delta = 0,3$ $\gamma = 0,1$ $SO = 129\ 000$ $TO = 2507$	$F_t = 0,9 \cdot (X_t - S_{t-4}) + 0,1 \cdot (F_{t-1} + T_{t-1});$ $T_t = 0,1 \cdot (F_t - F_{t-1}) + 0,9 \cdot T_{t-1};$ $S_t = 0,3 \cdot (X_t - F_t) + 0,7 \cdot S_{t-4}$	3,2
Средняя цена 1 м² квартир улучшенного качества на вторичном рынке жилья Average price per square meter of better-quality apartment on the secondary housing market	$\alpha = 0,8$ $\delta = 0,1$ $\gamma = 0,1$ $SO = 153\ 000$ $TO = 2591$	$F_t = 0,8 \cdot (X_t - S_{t-4}) + 0,2 \cdot (F_{t-1} + T_{t-1});$ $T_t = 0,1 \cdot (F_t - F_{t-1}) + 0,9 \cdot T_{t-1};$ $S_t = 0,1 \cdot (X_t - F_t) + 0,9 \cdot S_{t-4}$	3,2
Средняя цена 1 м² элитных квартир на вторичном рынке жилья Average price per square meter of luxury apartment on the secondary housing market	$\alpha = 0,7$ $\delta = 0,9$ $\gamma = 0,2$ $SO = 275\ 000$ $TO = 7282$	$F_t = 0,7 \cdot (X_t - S_{t-4}) + 0,3 \cdot (F_{t-1} + T_{t-1});$ $T_t = 0,2 \cdot (F_t - F_{t-1}) + 0,8 \cdot T_{t-1};$ $S_t = 0,9 \cdot (X_t - F_t) + 0,1 \cdot S_{t-4}$	5,1

Показатель Value	Значения параметров сглаживания Smoothing parameter values	Модель Model	Средняя ошибка аппрок- сима- ции, % Average approximation error, %
Средняя цена 1 м ² квартир на первичном рынке жилья Average price per square meter of apartment on the primary housing market	$\alpha = 0,9$ $\delta = 0,1$ $\gamma = 0,2$ $S_0 = 136\,000$ $T_0 = 3609$	$F_t = 0,9 \cdot (X_t - S_{t-4}) + 0,1 \cdot (F_{t-1} + T_{t-1});$ $T_t = 0,2 \cdot (F_t - F_{t-1}) + 0,8 \cdot T_{t-1};$ $S_t = 0,1 \cdot (X_t - F_t) + 0,9 \cdot S_{t-4}$	3,6
Средняя цена 1 м ² квартир среднего качества (типовых) на первичном рынке жилья Average price per square meter of mediocre (standard) apartment on the primary housing market	$\alpha = 0,8$ $\delta = 0,3$ $\gamma = 0,1$ $S_0 = 95\,400$ $T_0 = 2904$	$F_t = 0,8 \cdot (X_t - S_{t-4}) + 0,2 \cdot (F_{t-1} + T_{t-1});$ $T_t = 0,1 \cdot (F_t - F_{t-1}) + 0,9 \cdot T_{t-1};$ $S_t = 0,3 \cdot (X_t - F_t) + 0,7 \cdot S_{t-4}$	6,4
Средняя цена 1 м ² квартир улучшенного качества на первичном рынке жилья Average price per square meter of better-quality apartment on the primary housing market	$\alpha = 0,9$ $\delta = 0,1$ $\gamma = 0,1$ $S_0 = 108\,000$ $T_0 = 4091$	$F_t = 0,9 \cdot (X_t - S_{t-4}) + 0,1 \cdot (F_{t-1} + T_{t-1});$ $T_t = 0,1 \cdot (F_t - F_{t-1}) + 0,9 \cdot T_{t-1};$ $S_t = 0,1 \cdot (X_t - F_t) + 0,9 \cdot S_{t-4}$	3,9
Средняя цена 1 м ² элитных квартир на первичном рынке жилья Average price per square meter of luxury apartment on the primary housing market	$\alpha = 0,9$ $\delta = 0,1$ $\gamma = 0,2$ $S_0 = 235\,000$ $T_0 = 5770$	$F_t = 0,9 \cdot (X_t - S_{t-4}) + 0,1 \cdot (F_{t-1} + T_{t-1});$ $T_t = 0,2 \cdot (F_t - F_{t-1}) + 0,8 \cdot T_{t-1};$ $S_t = 0,1 \cdot (X_t - F_t) + 0,9 \cdot S_{t-4}$	4,2

Увеличение стоимости вторичного жилья за период 2010–2024 г. также было весьма существенным, хотя происходило меньшими темпами: в 1,9 раза на все типы квартир, в 2 раза на квартиры среднего качества, в 1,9 раза на квартиры улучшенного качества и в 2,4 раза на элитные (на элитное жилье на вторичном рынке темпы были выше, чем на первичном). В 2024 г. цены на 1 м² соответственно составили 322, 274, 304 и 697 тыс. руб. (табл. 1, 2).

Если рассматривать динамику по годам (табл. 3), можно заметить, что самое большое увеличение цен на квартиры среднего качества (типовые) наблюдалось в 2021 г. Тогда прирост цен по отношению к предыдущему году составил 37,6 % на вторичном рынке жилья и 44,4 % на первичном. Также периодами значительного роста цен были 2019 г. (увеличение на 28,2 % на первичном рынке) и 2022 г. (на 27,9 % на первичном рынке). Снижения цен на типовые квартиры по отношению к предыдущему году происходили на первичном рынке в 2011 г. (на 1,8 %), 2015 г. (7,2 %), 2016 г. (13,4 %), 2017 г. (на 7 %) и в 2023 г. (на 22,1 %); на вторичном рынке — в 2016 г. (на 7,9 %) и 2017 г. (на 2,6 %).

Самые существенные увеличения цен на квартиры улучшенного качества происходили в период 2021–2022 гг. (табл. 3): на 20–23 % на вторичном рынке жилья и 33–44 % на первичном рынке. Па-

дения цен регистрировались на вторичном рынке в 2016, 2017, 2018 гг. и 2024 г. на 0,7; 1,1; 6,1 и 5,9 % соответственно; и на первичном рынке в 2015, 2016 и 2023 гг. на 4,1; 6,5 и 12,2 % соответственно.

Наибольшие всплески цен на элитное жилье наблюдались в период 2022–2024 гг. (табл. 3): на вторичном рынке — на 53,9 % (2022 г.), 21,6 % (2023 г.), 38,5 % (2024 г.); на первичном рынке — на 28,5 % (2022 г.), 24,6 % (2023 г.), 12,3 % (2024 г.). Падение цен на элитное жилье отмечалось в 2011–2012 гг. (на вторичном рынке около 9–10 %, на первичном — 11–13 %), 2016 г. на первичном рынке на 6,6 %, 2017 г. на вторичном рынке на 3,4 %, в период 2018–2019 гг. (на вторичном рынке на 11–14 %, на первичном — 1,4–5 %), 2020 г. (на 2 % на первичном рынке), 2021 г. (на вторичном рынке на 2,5 %).

Среднегодовые темпы прироста цен на жилье в г. Москве за период 2010–2024 гг. составили: по всем типам квартир — на 4,8 % на вторичном рынке и на 6,5 % на первичном, по квартирам среднего качества (типовым) — на 5,3 % на вторичном рынке и 7,1 % на первичном; по квартирам улучшенного качества — на 4,8 % на вторичном рынке и 8,1 % на первичном; по элитным квартирам — на 6,5 % на вторичном рынке и на 6,2 % на первичном. За этот же период среднегодовые темпы прироста среднедушевого месячного дохода населения составили 7,7 %.



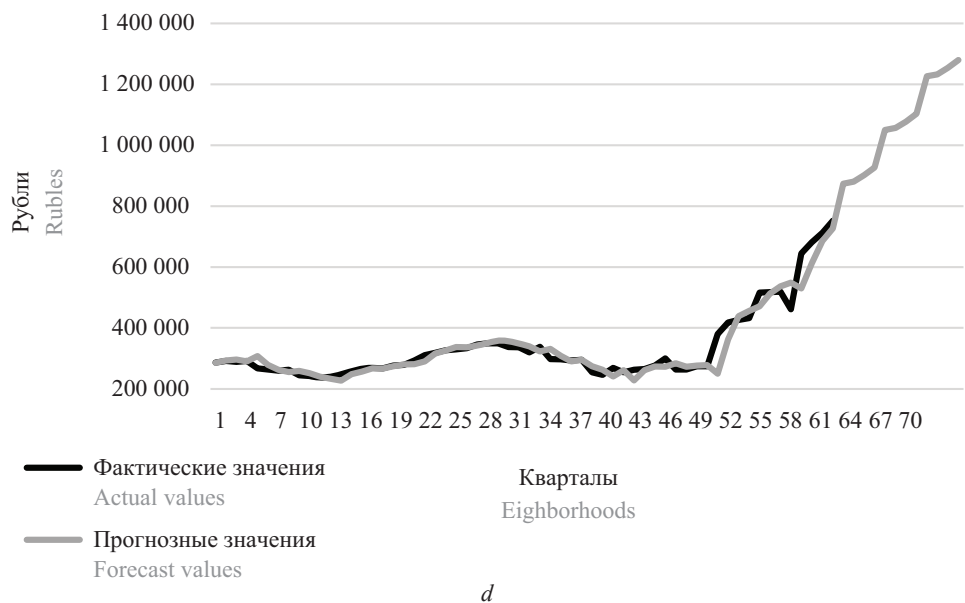


Рис. 1. Динамика средних цен на 1 м² квартир на вторичном рынке жилья в г. Москве (а); среднего качества (типовых) (b); улучшенного качества (с); элитных квартир (d)

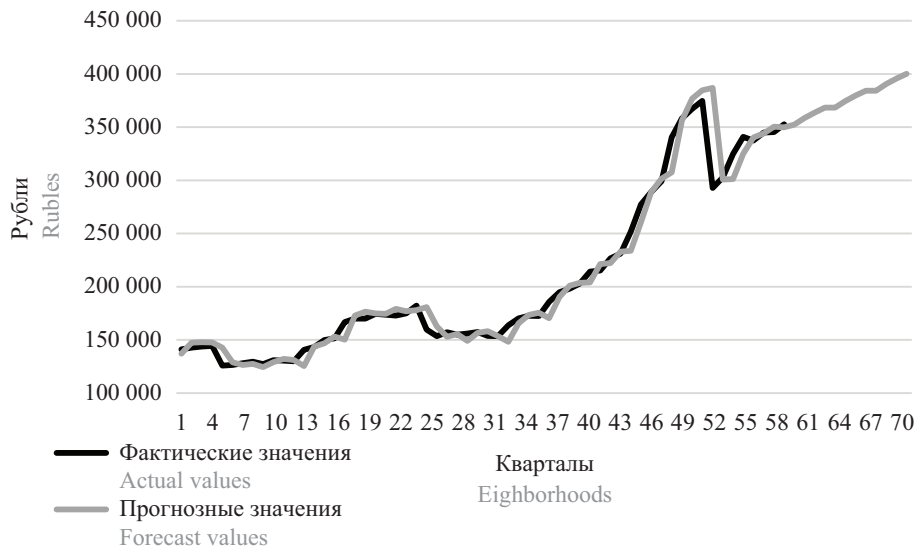
Fig. 1. Dynamics of average prices per square meter of apartments on the secondary housing market in Moscow (a); dynamics of average prices per square meter of mediocre (standard) quality apartments (b); dynamics of average prices per square meter of better-quality apartments (c); dynamics of average prices per square meter of luxury apartments (d)

Если сравнивать рост цен на жилье с увеличением среднедушевых месячных доходов населения за период с 2010 г. по 2024 г.², то увидим, что они выросли в 2,8 раза, что вполне сопоставимо с увеличением цен на жилье (табл. 2). Таким образом, с точки зрения покупательной способности населения доступность жилья в среднем осталась практически на том же уровне. Принимая во внимание, что среднедушевой доход рассчитывается путем деления суммарного дохода населения на количество жителей, и то обстоятельство, что совокупность населения г. Москвы весьма неоднородна по показателю доходов (небольшая доля богатых людей и значительная доля бедных), то для характеристики благосостояния лучше подходит показатель медианного душевого дохода (при нем 50 % населения имеют доход ниже медианного значения, 50 % — выше). Рассчитанные по г. Москве его значения по годам ниже среднедушевого дохода приблизительно в 1,3–1,5 раза³, на протяжении 2013–2023 гг. данное соотношение практически не менялось. Значит, темпы роста медианного душевого дохода приблизительно равны темпам роста среднедушевого

родна по показателю доходов (небольшая доля богатых людей и значительная доля бедных), то для характеристики благосостояния лучше подходит показатель медианного душевого дохода (при нем 50 % населения имеют доход ниже медианного значения, 50 % — выше). Рассчитанные по г. Москве его значения по годам ниже среднедушевого дохода приблизительно в 1,3–1,5 раза³, на протяжении 2013–2023 гг. данное соотношение практически не менялось. Значит, темпы роста медианного душевого дохода приблизительно равны темпам роста среднедушевого

² Денежные доходы (в среднем на душу) // ЕМИСС. URL: <https://fedstat.ru/indicator/30992>

³ Медианная зарплата в России // GOGOV. URL: <https://gogov.ru/articles/median-salary#data>



a



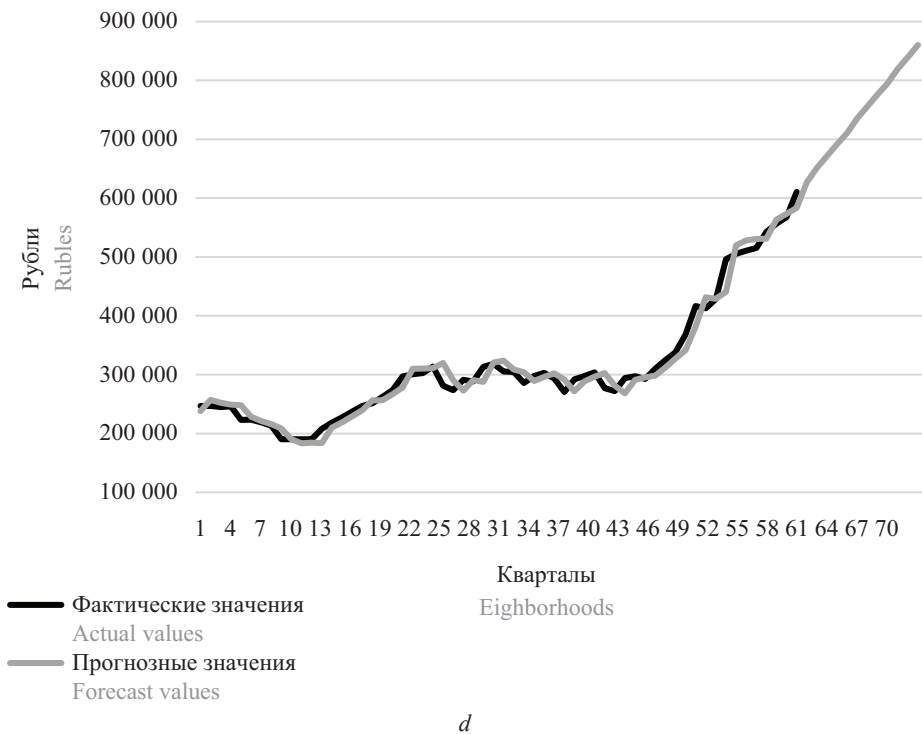


Рис. 2. Динамика средних цен на 1 м² квартир на первичном рынке жилья в г. Москве (а); среднего качества (типовых) (b); улучшенного качества (с); элитных квартир (d)

Fig. 2. Dynamics of average prices per square meter of apartments on the primary housing market in Moscow (a); dynamics of average prices per square meter of mediocre (standard) apartments (b); dynamics of average prices per square meter of better-quality apartments (c); dynamics of average prices per square meter of luxury apartments (d)

дохода и, соответственно, с позиций изменения медианного дохода доступность жилья для населения на протяжении всего периода с 2010 по 2024 г. также оставалась на прежнем уровне. К сожалению, эта доступность низкая, т.е. для большинства населения г. Москвы покупка жилья дорогостоящее мероприятие.

Так, в 2013 г. на медианный душевой доход (39 948 руб. в месяц [9]) можно было купить 0,29 м² квартиры среднего качества (типовой) на первичном рынке жилья, в 2023 г. цифра практически не изменилась и составила 0,32 м² (медианный доход 2023 г. — 84 757 руб. в месяц [9]).

Табл. 5. Прогнозы средних цен на вторичное жилье в г. Москве, руб.

Table 5. Forecasts of average prices for secondary housing in Moscow, rubles

Кварталы Quarters	Средняя цена 1 м ² квартир Average price per square meter of apartment	Средняя цена 1 м ² квартир среднего качества (типовых) Average price per square meter of mediocre (standard) apartment	Средняя цена 1 м ² квартир улучшенного качества Average price per square meter of better- quality apartment	Средняя цена 1 м ² элитных квартир Average price per square meter of luxury apartment
2025 г. / year				
III	327 287	265 009	311 822	901 612
IV	329 740	268 774	314 523	927 188
2026 г. / year				
I	329 729	269 704	314 849	1 050 150
II	334 253	273 283	320 141	1 056 455
III	336 511	272 981	323 857	1 077 793
IV	338 963	276 746	326 557	1 103 369
2027 г. / year				
I	338 952	277 675	326 884	1 226 331
II	343 476	281 254	332 176	1 232 636
III	345 734	280 952	335 891	1 253 974
IV	348 186	284 717	338 592	1 279 550

Табл. 6. Прогнозы средних цен на первичное жилье в г. Москве, руб.
Table 6. Forecasts of average prices for primary housing in Moscow, rubles

Кварталы Quarters	Средняя цена 1 м² квартир Average price per square meter of apartment	Средняя цена 1 м² квартир среднего качества (типовых) Average price per square meter of mediocre (standard) apartment	Средняя цена 1 м² квартир улучшенного качества Average price per square meter of better- quality apartment	Средняя цена 1 м² элитных квартир Average price per square meter of luxury apartment
2025 г. / year				
III	363 766	275 633	373 198	671 647
IV	368 318	273 255	379 989	692 046
2026 г. / year				
I	368 317	283 515	384 944	710 937
II	374 565	279 676	393 423	735 553
III	379 672	288 498	400 802	755 669
IV	384 224	286 121	407 593	776 068
2027 г. / year				
I	384 223	296 380	412 548	794 959
II	390 471	292 541	421 026	819 575
III	395 578	301 364	428 406	839 691
IV	400 131	298 986	435 197	860 091

Результаты прогнозирования цен на жилье
в г. Москве на период 2025–2027 гг.

Для прогнозирования цен на жилую недвижимость г. Москвы были рассмотрены модели аналитического выравнивания (линейная функция, параболическая, степенная, показательная), интегрированные модели авторегрессии и скользящего среднего (ARIMA, SARIMA), модели экспоненциального сглаживания Хольта – Винтерса с учетом тренда (линейного и нелинейного) и сезонности (аддитивной и мультипликативной). Наименьшие ошибки аппроксимации показали модели тройного экспоненциального сглаживания Винтерса, учитывающие линейный тренд и аддитивную сезонность с лагом, равным 4 периодам (год). Их характеристики приведены в табл. 4.

По графикам на рис. 1, 2 видно, что фактические и рассчитанные по моделям значения достаточно близки друг к другу, что позволяет надеяться на получение достоверных прогнозов.

Таким образом, средняя цена 1 м² типовых квартир на вторичном рынке жилья может к концу 2025 г. достигнуть 269 тыс. руб., к 2026 г. — 277 тыс. руб., к 2027 г. — 285 тыс. руб. (табл. 5); на первичном рынке — 273, 286, 299 тыс. руб. соответственно (табл. 6). Также ожидается рост цен на квартиры улучшенного качества. К концу 2025 г. их средняя цена прогнозируется на вторичном рынке на уровне 314 тыс. руб. за 1 м², к концу 2026 г. — 326 тыс. руб., 2027 г. — 338 тыс. руб.; на первичном рынке — 380, 407, 435 тыс. руб. соответственно по 2025–2027 гг.

При сохранении тенденций к росту цен на элитные квартиры их цена на 1 м² будет еще более высокой. Уже к концу 2025 г. она поднимется до 927 тыс. руб. на вторичном рынке и 692 тыс. руб. на первич-

ном, к концу 2026 г. — 1103 (вторичный рынок) и 776 тыс. руб. (первичный рынок), к концу 2027 г. — 1279 и 860 тыс. руб. соответственно (табл. 5, 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За период 2010–2024 гг. наиболее интенсивно росла цена на первичное жилье со средними темпами роста 106,5 % в год, в то время как на вторичном рынке — 104,8 % в год. Среди всех рассмотренных типов квартир наибольший прирост цен наблюдался у квартир улучшенного качества на первичном рынке жилья (8,1 %), наименьший — у этого же типа квартир, но на вторичном рынке (4,8 % в год).

Динамику цен на жилье в г. Москве можно описать моделями тройного экспоненциального сглаживания Винтерса, учитывающими линейный тренд и аддитивную (постоянную) сезонность с лагом, равным 4 периодам (год), если предполагается квартальное прогнозирование. Это лучшие модели из всех рассмотренных (аналитического сглаживания, экспоненциального сглаживания Хольта – Винтерса, ARIMA, SARIMA). Ошибка аппроксимации в этом случае находится в пределах 2–6 %, что в соответствии со шкалой оценки качества расценивает модели как «отличного» и «хорошего» качества.

Согласно полученным прогнозам на вторичном рынке жилья прирост средних цен на 1 м² в г. Москве по всем типам квартир может составить 2,5 % в конце 2025 г., 5,3 % в конце 2026 г., 8,2 % в конце 2027 г.; на первичном рынке — 6,7 % в конце 2025 г., 11,3 % в конце 2026 г., 15,9 % в конце 2027 г. по отношению к концу 2024 г.

Таким образом, при сохранении тенденций 2010–2024 гг. наибольший рост цен в период 2025–2027 гг. ожидается на элитное жилье вторичного рынка жилья, наименьший — на квартиры среднего и улучшенного качества также вторичного рынка жилья.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Васильева Е.Ю., Даниелян М.Г. Нейминг как один из факторов ценообразования в сфере жилищного строительства на примере жилых комплексов Москвы и Московской области // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 2. С. 315–327. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.315-327. EDN DLLYCF.
2. Пяткина Д.А. Методология эконометрического моделирования на рынке недвижимости Москвы // Экономика и предпринимательство. 2021. № 6 (131). С. 410–416. DOI: 10.34925/EIP.2021.131.6.080. EDN POOYKG.
3. Гончаров Г.И., Натхов Т.В. Текстуальный анализ ценообразования на рынке московской жилой недвижимости // Экономический журнал Высшей школы экономики. 2020. Т. 24. № 1. С. 101–116. DOI: 10.17323/1813-8691-2020-24-1-101-116. EDN NWRXZF.
4. Четвериков В.М., Чурбанов Р.Р. Сравнительный статистический анализ изменения средних цен предложения жилья в административных округах г. Москвы // Вопросы статистики. 2024. Т. 31. № 5. С. 41–56. DOI: 10.34023/2313-6383-2024-31-5-41-56. EDN STFORH.
5. Косякина А.И. «Пузырь» на рынке жилья? Анализ на основе метода повторных продаж для вторичного рынка Москвы и Санкт-Петербурга // Прикладная эконометрика. 2023. № 2 (70). С. 72–88. DOI: 10.22394/1993-7601-2023-70-72-88. EDN ZSSUKK.
6. Богданова Ю.Н., Хоркина Ж.А. Платежеспособный спрос и уровень доступности жилья на рынке недвижимости Москвы // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 11. С. 63–68. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.11.63-68. EDN VDCCGR.
7. Мальцева Е.В., Саргина Л.В., Амирова Н.Р. Современные тенденции развития рынка первичного жилья в Москве // Постсоветский материк. 2024. № 4 (44). С. 104–115. DOI: 10.48137/23116412_2024_4_104. EDN JAWBHH.
8. Дорожкин Д.А. Анализ тенденций рынка недвижимости г. Москвы в условиях реализации Программы реновации // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15. № S2. EDN IBHDTI.
9. Беляков С.И., Соловьёв А.А., Ремизов И.Р., Смирнов А.В. Анализ тенденций развития и подходов к классификации жилой недвижимости на примере бизнес-класса в городе Москве // Недвижимость: экономика, управление. 2024. № S3. С. 72–76. EDN RBPBAK.
10. Петрова П.М. Анализ стратегических тенденций факторов, влияющих на рынок недвижимости Москвы // Экономическое возрождение России. 2023. № 2 (76). С. 147–161. DOI: 10.37930/1990-9780-2023-2(76)-147-161. EDN GJPNOU.
11. Мамедли М.О., Умнов А.В. Оценка стоимости недвижимости на основе больших данных // Вопросы экономики. 2022. № 12. С. 118–136. DOI: 10.32609/0042-8736-2022-12-118-136. EDN CBGUTC.
12. Богданова Т.К., Камалова А.Р., Кравченко Т.К., Полторак А.И. Проблемы моделирования оценки стоимости жилой недвижимости // Бизнес-информатика. 2020. Т. 14. № 3. С. 7–23. DOI: 10.17323/2587-814X.2020.3.7.23. EDN WBRIDX.
13. Голубев Е.Ж. Анализ рынка недвижимости в Москве: применение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования цен на квартиры // Экономика строительства. 2024. № 4. С. 222–224. EDN SXCBUO.
14. Хоркина Ж.А., Богданова Ю.Н. Обзор инструментов повышения платежеспособного спроса и характеристик покупателей жилой недвижимости // Жилищное строительство. 2020. № 11. С. 3–9. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-11-3-9. EDN VPBBTI.
15. Грахов В.П., Гумерова Л.Д., Поздеев Д.А. Моделирование структурных сдвигов на рынке жилищного строительства РФ // Экономика и предпринимательство. 2022. № 3 (140). С. 1135–1140. DOI: 10.34925/EIP.2022.140.03.216. EDN AVJQOC.
16. Лозовская А.Н. Доступность жилья как современная проблема российского общества // Modern Economy Success. 2023. № 6. С. 234–240. EDN LYESDS.
17. Осипов А.С. Особенности формирования комплексного ценностного предложения на рынке жилой недвижимости Москвы // Маркетинг и маркетинговые исследования. 2022. № 1. С. 56–66. DOI: 10.36627/2074-5095-2022-1-1-56-66. EDN IWPINE.
18. Ивкова Е.Д. Оценка рынка недвижимости России // Вестник Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова. Вступление. Путь в науку. 2023. Т. 13. № 4 (44). С. 79–91. EDN DOBPRS.
19. Столярчук М.О., Чельшева Э.А. Анализ состояния и основных тенденций развития инвестиционно-строительного рынка жилой недвижимости г. Москвы и Московской области // Финансовые исследования. 2023. Т. 24. № 3 (80). С. 44–57. DOI: 10.54220/finis.1991-0525.2023.80.3.004. EDN XSAMZC.
20. Gravatt D., Beracha E., Johnson K.H. A Note on the Estimation of the Degree of Over- or Under-Pricing of Housing Markets Relative to Their Long-Term Pricing Trend // Journal of Housing Research. 2022. Vol. 31. No. 1. Pp. 1–3. DOI: 10.1080/10527001.2021.2007584. EDN LPTIFG.
21. Milunovich G. Forecasting Australia's real house price index: A comparison of time series and machine learning methods // Journal of Forecasting. 2020. Vol. 39. No. 7. Pp. 1098–1118. DOI: 10.1002/for.2678. EDN TRMMOM.

22. *Bereitschaft B.* The Declining Impact of Walkability and Transit Accessibility on U.S. Home Values During the COVID-19 Pandemic // *Journal of Housing Research*. 2025. Pp. 1–21. DOI: 10.1080/10527001.2025.2477938

23. *Will S., Renz T.* In Debt but Still Happy? Homeownership and the Satisfaction with Housing and Life // *Journal of Housing Research*. 2024. Vol. 34. Issue 1. Pp. 29–59. DOI: 10.1080/10527001.2024.2367279

24. *Jørgensen P.L.* The global savings glut and the housing boom // *Journal of Economic Dynamics and Control*. 2023. Vol. 146. P. 104563. DOI: 10.1016/j.jedc.2022.104563

25. *Kuroki M., Wei W.* The Housing and Rental Price Effects of Unskilled and Skilled Immigration in

the United States: 2013–2017 // *Journal of Housing Research*. 2020. Vol. 29. Issue 2. Pp. 179–194. DOI: 10.1080/10527001.2020.1846430

26. *Gandr  P.* A Note on Learning, House Prices, and Macro-Financial Linkages // *Macroeconomic Dynamics*. 2023. Vol. 27. Issue 7. Pp. 1996–2011. DOI: 10.1017/S1365100522000566

27. *Caines C.* Can learning explain boom-bust cycles in asset prices? An application to the US housing boom // *Journal of Macroeconomics*. 2020. Vol. 66. P. 103256. DOI: 10.1016/j.jmacro.2020.103256

28. *McGurk Z., Zaporowski M.* U.S. Bilateral Capital Inflows and Housing Price Return Predictability // *Journal of Housing Research*. 2025. Pp. 1–23. DOI: 10.1080/10527001.2025.2465020

Поступила в редакцию 16 апреля 2025 г.

Принята в доработанном виде 24 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 6 июня 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: Эльвира Юрьевна Чурилова — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры бизнес-аналитики; Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации; 125167, г. Москва, Ленинградский проспект, д. 49/2; SPIN-код: 5976-0737, РИНЦ ID: 475729, ORCID: 0000-0001-9753-0072; EChurilova@fa.ru.

REFERENCES

1. Vasilyeva E.Yu., Daniyelyan M.G. Naming as one of pricing factors in the field of house construction on the example of housing estates in Moscow and Moscow region. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):315-327. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.315-327. EDN DLLYCF. (rus.).

2. Pyatkina D.A. Econometric modeling methodology in the Moscow real estate market. *Economy and Entrepreneurship*. 2021; 6(131):410-416. DOI: 10.34925/EIP.2021.131.6.080. EDN POOYKG. (rus.).

3. Goncharov G., Natkhov T. Textual analysis of pricing in the Moscow residential real estate market. *HSE Economic Journal*. 2020; 24(1):101-116. DOI: 10.17323/1813-8691-2020-24-1-101-116. EDN NWRXZF. (rus.).

4. Chetverikov V.M., Churbanov R.R. Comparative statistical analysis of changes in average asking prices for housing in the administrative districts of Moscow. *Voprosy Statistiki*. 2024; 31(5):41-56. DOI: 10.34023/2313-6383-2024-31-5-41-56. EDN STFOPH. (rus.).

5. Kosyakina A. A bubble in the housing market? Analysis based on the repeat-sales method for the secondary market in Moscow and Saint Petersburg. *Applied Econometrics*. 2023; 2(70):72-88. DOI: 10.22394/1993-7601-2023-70-72-88. EDN ZSSUKK. (rus.).

6. Bogdanova Yu.N., Horkina Zh.A. Solvent demand and housing affordability levels in the Moscow residential real estate market. *Industrial and Civil*

Engineering. 2020; 11:63-68. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.11.63-68. EDN VDCCGR. (rus.).

7. Maltseva E.V., Sargina L.V., Amirova N.R. Modern trends in the development of the primary housing market in Moscow. *Post-Soviet Continent*. 2024; 4(44):104-115. DOI: 10.48137/23116412_2024_4_104. EDN JAWBHH. (rus.).

8. Dorozhkin D.A. Analysis of trends in the real estate market in Moscow in the context of the implementation of the renovation program. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(S2). EDN IBHDTI. (rus.).

9. Belyakov S.I., Solovyov A.A., Remizov I.R., Smirnov A.V. Analysis of development trends and approaches to the classification of residential real estate using the example of a business class in Moscow. *Real Estate: Economics, Management*. 2024; S3:72-76. EDN RBPBAK. (rus.).

10. Petrova P.M. Analysis of strategic trends of factors influencing the Moscow real estate market. *Economic Revival of Russia*. 2023; 2(76):147-161. DOI: 10.37930/1990-9780-2023-2(76)-147-161. EDN GJPNOU. (rus.).

11. Mamedli M.O., Umnov A.V. Real estate valuation based on big data. *Voprosy Ekonomiki*. 2022; 12:118-136. DOI: 10.32609/0042-8736-2022-12-118-136. EDN CBGUTC. (rus.).

12. Bogdanova T.K., Kamalova A.R., Kravchenko T.K., Poltorak A.I. Problems of modeling the valuation of residential properties. *Business Informatics*. 2020;

14(3):7-23. DOI: 10.17323/2587-814X.2020.3.7.23. EDN WBRIDX. (rus.).

13. Golubev E.Zh. Analysis of the real estate market in Moscow: application of machine learning algorithms to predict apartment prices. *Construction Economics*. 2024; 4:222-224. EDN SXCBUO. (rus.).

14. Khorkina G.A., Bogdanova Yu.N. Overview of tools for increasing effective demand and characteristics of residential property buyers. *Housing Construction*. 2020; 11:3-9. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-11-3-9. EDN VPBBTI. (rus.).

15. Grahov V.P., Gumerova L.D., Pozdeev D.A. Modeling of structural changes in the housing construction market of the Russian Federation. *Economy and Entrepreneurship*. 2022; 3(140):1135-1140. DOI: 10.34925/EIP.2022.140.03.216. EDN AVJQOC. (rus.).

16. Lozovskaya A.N. Availability of housing as a modern problem of Russian society. *Modern Economy Success*. 2023; 6:234-240. EDN LYESDS. (rus.).

17. Osipov A.S. Features of the formation of a comprehensive value proposition in the residential real estate market in Moscow. *Marketing and Marketing Research*. 2022; 1:56-66. DOI: 10.36627/2074-5095-2022-1-1-56-66. EDN IWPINE. (rus.).

18. Ivkova E.D. Assessment of the Russian real estate market. Bulletin of the Plekhanov Russian University of Economics. Introduction. *Path to Science*. 2023; 13(4):(44):79-91. EDN DOBPRS. (rus.).

19. Stolyarchuk M.O., Chelysheva E.A. Analysis of the state and major trends in the development of the investment and construction market of residential real estate in Moscow and the Moscow region. *Financial Research*. 2023; 24(3):(80):44-57. DOI: 10.54220/finis.1991-0525.2023.80.3.004. EDN XSAMZC. (rus.).

20. Gravatt D., Beracha E., Johnson K.H. A Note on the Estimation of the Degree of Over- or Under-Pricing of Housing Markets Relative to Their Long-Term

Pricing Trend. *Journal of Housing Research*. 2022; 31(1):1-3. DOI: 10.1080/10527001.2021.2007584. EDN LPTIFG.

21. Milunovich G. Forecasting Australia's real house price index: A comparison of time series and machine learning methods. *Journal of Forecasting*. 2020; 39(7):1098-1118. DOI: 10.1002/for.2678. EDN TRMMOM.

22. Bereitschaft B. The Declining Impact of Walkability and Transit Accessibility on U.S. Home Values During the COVID-19 Pandemic. *Journal of Housing Research*. 2025; 1-21. DOI: 10.1080/10527001.2025.2477938

23. Will S., Renz T. In Debt but Still Happy? Homeownership and the Satisfaction with Housing and Life. *Journal of Housing Research*. 2024; 34(1):29-59. DOI: 10.1080/10527001.2024.2367279

24. Jørgensen P.L. The global savings glut and the housing boom. *Journal of Economic Dynamics and Control*. 2023; 146:104563. DOI: 10.1016/j.jedc.2022.104563

25. Kuroki M., Wei W. The Housing and Rental Price Effects of Unskilled and Skilled Immigration in the United States: 2013–2017. *Journal of Housing Research*. 2020; 29(2):179-194. DOI: 10.1080/10527001.2020.1846430

26. Gandré P. A Note on Learning, House Prices, and Macro-Financial Linkages. *Macroeconomic Dynamics*. 2023; 27(7):1996-2011. DOI: 10.1017/S13651005-22000566

27. Caines C. Can learning explain boom-bust cycles in asset prices? An application to the US housing boom. *Journal of Macroeconomics*. 2020; 66:103256. DOI: 10.1016/j.jmacro.2020.103256

28. McGurk Z., Zaporowski M.U.S. Bilateral Capital Inflows and Housing Price Return Predictability. *Journal of Housing Research*. 2025; 1-23. DOI: 10.1080/10527001.2025.2465020

Received April 16, 2025.

Adopted in revised form on April 24, 2025.

Approved for publication on June 6, 2025.

BIONOTES: **Elvira Yu. Churilova** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Business Analytics; **Financial University under the Government of the Russian Federation**; 49/2 Leningradsky prospekt, Moscow, 125167, Russian Federation; SPIN-code: 5976-0737, ID RSCI: 475729, ORCID: 0000-0001-9753-0072; EChurilova@fa.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 519.237.5

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1401-1418

Оценка факторов и модель производства свайных работ при строительстве и восстановлении зданий

Александр Алексеевич Руденко, Сергей Викторович Сазонов

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность исследования объясняется тем обстоятельством, что вопросы расчета, оценки несущего основания, конструкционного проектирования свай проработаны достаточно подробно, а вопросы оценки эффективности производства свайных работ на этапах нового строительства и различных видов ремонта изучены недостаточно. Целью исследования является определение наиболее значимых факторов, влияющих на трудоемкость устройства свайных фундаментов, с разработкой модели их воздействия на результирующий показатель. Задача исследования — определить и рассчитать вес факторов, влияющих на трудоемкость свайных работ, и разработать математическую модель, учитывающую характер влияния наиболее значимых факторов.

Материалы и методы. Для достижения цели и задач исследования применялись экспертная оценка, методы статистической обработки, оценки информации, что позволило выявить зависимость между переменными и определить количественные характеристики их учета.

Результаты. Разработана математическая модель по оценке трудоемкости работ при устройстве свайных фундаментов, позволяющая выявить характер влияния значимых факторов на результирующий показатель. В качестве наиболее рационального и универсального по совокупности преимуществ в исследовании принят метод вдавливания свай с дополненной в данном исследовании технологией производства работ.

Выводы. Выявлены наиболее значимые факторы, влияющие на эффективность свайных работ. Разработанная математическая модель (уравнения регрессии) комплексно учитывает степень влияния каждого фактора на результирующий показатель Y_i (трудозатраты), что позволит эффективно планировать работы по устройству фундаментов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: регрессионный анализ, экспертная оценка, трудоемкость, свайные фундаменты, участок строительства, факторы оценки

Благодарности. Работа выполнена в рамках гранта НПР СПбГАСУ № 20-НПР-25 «Организация восстановления и ремонта зданий после взрывного воздействия на основе комплексного подхода с использованием лазерного сканирования, нейросетевого и 3-D моделирования».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Руденко А.А., Сазонов С.В. Оценка факторов и модель производства свайных работ при строительстве и восстановлении зданий // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 9. С. 1401–1418. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1401-1418

Автор, ответственный за переписку: Александр Алексеевич Руденко, rudenkoa.a@mail.ru.

Factor assessment and piling production model for construction and restoration of buildings

Aleksandr A. Rudenko, Sergey V. Sazonov

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the study is explained by the fact that the issues of calculation, assessment of the bearing base, and structural design of piles have been worked out in sufficient detail, while the issues of evaluating the effectiveness of pile work at the stages of new construction and various types of repairs have not been sufficiently investigated. The aim of the study is to identify the most significant factors affecting the complexity of pile foundations with the development of a model of their impact on the resulting indicator. The objective of the study is to determine and calculate the weight of factors affecting the complexity of pile work and to develop a mathematical model that takes into account the nature of the influence of the most significant factors.

Materials and methods. To achieve the goals and objectives of the study, expert assessment, statistical processing methods, and information evaluation were used, which made it possible to identify the relationship between variables and quantify their accounting.

Results. A mathematical model has been developed to assess the complexity of work in the construction of pile foundations, which makes it possible to identify the nature of the influence of significant factors on the resulting indicator. As the most

rational and universal, according to the set of advantages, the study adopted the method of "pile pressing", with the technology of work supplemented in this study.

Conclusions. The conducted study made it possible to identify and study the most significant factors affecting the efficiency of pile work. The developed mathematical model (regression equations) allowed to comprehensively take into account the degree of influence of each factor on the resulting indicator Y_i (labour costs), which will allow to effectively plan the work on the construction of foundations.

KEYWORDS: regression analysis, expert assessment, labour intensity, pile foundations, construction site, assessment factors

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of grant of the Scientific and Practical Works of St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering No. 20-NPR-25 "Organization of restoration and repair of buildings after explosive impact based on an integrated approach using laser scanning, neural network and 3-D modeling".

FOR CITATION: Rudenko A.A., Sazonov S.V. Factor assessment and piling production model for construction and restoration of buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(9):1401-1418. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1401-1418 (rus.).

Corresponding author: Aleksandr A. Rudenko, rudenkoa.a@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Новое строительное и различные виды ремонта (восстановления) обладают большим разнообразием конструкций, применяемых для создания устойчивых и долговечных фундаментов зданий и сооружений. При этом следует отметить, что достаточно часто используются свайные фундаменты, обладающие неоспоримыми преимуществами.

Построенные и эксплуатируемые в настоящее время, а также проектируемые здания все чаще характеризуются:

- большой высотой (Бурдж-Халифа в ОАЭ, Шанхайская башня в КНР, Останкинская башня в России, Си-Эн Тауэр в Канаде и т.д.);
- массой (Глобальный центр «Новый век» в Китае; терминал из 3 аэропортов в ОАЭ; Абрадж аль-Бейт в Мекке, Саудовская Аравия и т.д.);
- слабым несущим грунтовым основанием (что характерно для многих эксплуатируемых и строящихся зданий в г. Санкт-Петербурге и Ленинградской области, а также на других территориях).

Исследованию расчета свайных фундаментов посвящены работы многих ученых, в том числе П.А. Аббасова, А.А. Бартоломея, Б.В. Бахолдина, А.С. Буслова, Г.И. Глушкова, В.В. Верстова, А.Н. Гайдо, Б.В. Гончарова, А.А. Григорян, Н.М. Дорошкевич, К.С. Завриева, В.В. Знаменского, В.А. Ильичева, Э.В. Костерина, А.А. Луга, Ю.Г. Трофименкова, В.М. Улицкого, В.Г. Федоровского, С.Г. Богова, П.А. Коновалова, М.Б. Лисюка, Р.А. Мангушева, В.М. Улицкого, А.Г. Шашкина, R. Cooke, T. Dawson, S. Lacasse, H. Matlock, L. Reese, P. Sparrevika, H. Poulosa и др. Вместе с тем комплексная оценка эффективности устройства свайных фундаментов исследована недостаточно.

Оценка эффективности выполнения свайных работ в процессе нового строительства изучена в большей степени, чем эффективность свайных работ при восстановлении, ремонте и реконструкции зданий. Это необоснованно, так как в послед-

нее время в России и в других странах для большого количества зданий требуется проведение работ по реконструкции, ремонту и восстановлению. Последнее, кроме всего прочего, является актуальным ввиду повреждения существенного количества зданий на территориях с введенным режимом контртеррористической операции, где при восстановлении предусматриваются и процессы реконструкции с устройством пристроек, мансард, надстройкой дополнительных этажей, заменой несущих конструкций и т.п. В таких случаях обычно возникает необходимость в усилении или устройстве дополнительных свайных фундаментов.

Инженерно-геологические условия строительной площадки в значительной степени определяют типы фундаментов, а также прочность и устойчивость оснований зданий и сооружений [1–3].

Свайные фундаменты, как один из наиболее эффективных способов передачи нагрузки на слабые и неустойчивые грунты, подтвердили важность в инженерной практике. Однако успешность их реализации во многом зависит от корректной оценки трудоемкости работ, осуществляемых при устройстве свай, что требует глубокого понимания влияния различных факторов.

Планируя оценку факторов, в качестве критерия оценки эффективности свайных работ были приняты трудозатраты, определяющие и продолжительность свайных работ, и их сметную стоимость.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С появлением новых методов строительства, строительных конструкций, машин и механизмов необходимо более тщательное технико-экономическое сравнение возможных вариантов устройства фундаментов, что актуально с увеличением объемов капитального строительства. Под строительство отводятся все чаще площадки со сложными для строительства инженерно-геологическими условиями. Вследствие увеличения пролетов в промышленном строительстве

и числа этажей в гражданском строительстве резко возрастают нагрузки на фундаменты [4].

Для оценки трудоемкости в этой области часто полагаются на эмпирические данные и интуитивный подход, что часто приводит к значительным отклонениям от реальных затрат времени и ресурсов. В связи с этим возникает необходимость в апробированных аналитических подходах, которые позволят не только повысить точность оценки трудоемкости, но и оптимизировать процессы проектирования, выбора методов производства и выполнения работ.

Регрессионный анализ, как метод математической статистики, дает возможность выявлять зависимость между множеством переменных и находить количественные характеристики, которые могут служить основанием для принятия обоснованных решений в проектировании и планировании строительных работ [5, 6].

В настоящей статье рассматривается применение регрессионного анализа как инструмента, позволяющего определить ключевые параметры, влияющие на оценку трудоемкости устройства свайных оснований от различных факторов, и выявить зависимость.

В процессе формирования и выбора решения указанной задачи применен метод экспертных оценок. Его сущность заключается в рациональной организации проведения экспертами анализа задачи с количественной оценкой суждений и обработкой их результатов. Мнение группы экспертов в обобщенном виде принимается за решение задачи. При принятии решений эксперты выполняют информационную и аналитическую работу по формированию и оценке решений. Все многообразие решаемых ими задач сводится к одному: формированию и оценке характеристик объектов. В качестве экспертов выступили шесть специалистов, обладающих огромным практическим и теоретическим опытом и необходимыми компетенциями в области фундаментостроения, проектирования, геотехники, а также производства работ по устройству свайных оснований, что повышает качество анализа данных.

За критерий оценки устройства свайных оснований современными методами в зависимости от расположения участка строительства был принят показатель трудоемкость Y_i . При этом для усреднения и возможности оценки применительно к различным методам и технологиям устройства свайных оснований Y_i считаем на 1 м^3 произведенного свайного фундамента.

В результате опроса группы экспертов, определения согласованности мнений и обобщения данных отобрано 33 фактора, оказывающих влияние на Y_i в зависимости от расположения площадки строительства и применяемой технологии/метода устройства свайного основания.

На основании нормативных документов^{1, 2, 3} и с учетом практической деятельности массового применения и обоснования выбора технологий, экономических факторов и эксплуатационных требований, анализа грунтовых условий, в которых производилось заложение свайных фундаментов, были выделены следующие методы: ударный метод (забивкой), вдавливанием, буровые (выполняемые на месте) [7–9].

Использование любой технологии представляет опасность для окружающей застройки, так как технологические процессы, связанные с производством работ, оказывают негативные воздействия на ближайшие здания и сооружения [10–12].

В этой связи выбор свайных технологий следует проводить в зависимости от расположения участка строительства относительно окружающей застройки и инженерно-геологических характеристик его разреза. По расположению участка строительства выделено три варианта: в исторической части города; в квартале нового строительства; в современном застроенном квартале [13–16].

Анализ исследований [15, 16] позволил определить факторы, влияющие на показатель трудозатраты. Факторы, воздействующие на Y_i , вначале были сформированы в группы (рис. 1), что сделало анализ более структурированным и понятным.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Далее анализ [17–20] каждой из групп дал возможность сформировать факторы по каждой группе, которые могут оказывать влияние на эффективность

¹ СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83* : утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16.12.2016 № 970/пр; дата введения 17.06.2017 / Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова (НИИОСП им. Н.М.Герсеванова) — институт АО «НИЦ “Строительство”». М., 2016. 204 с.

² СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03–85 : утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 14.12.2021 № 926/пр; дата введения 15.01.2022 / Акционерное общество «Научно-исследовательский центр “Строительство”» (АО «НИЦ “Строительство”») — Научно-исследовательский проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова (НИИОСП им. Н.М. Герсеванова). М., 2021. 113 с.

³ ТСН 50-302–2004. Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге : принят распоряжением Комитета по строительству Правительства Санкт-Петербурга от 05.08.2004 № 11 / Санкт-Петербургская экспертно-консультативная комиссия по основаниям, фундаментам и подземным сооружениям. М., 2004. 58 с.

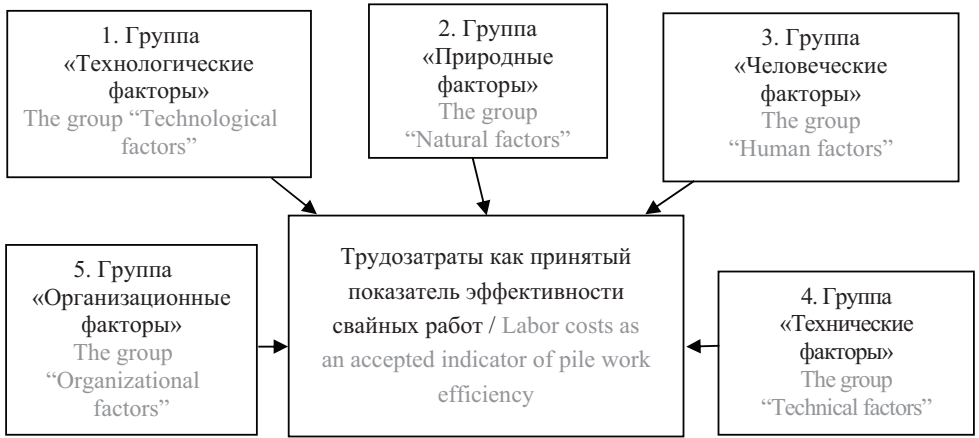


Рис. 1. Структурная модель учета факторов, влияющих на эффективность работ по устройству фундаментов
Fig. 1. Structural model of factors influencing the efficiency of foundation construction

Табл. 1. Элементы структурной модели учета факторов, влияющих на трудоемкость Y_i выполнения работ по устройству свайных фундаментов
Table 1. Elements of the structural model of factors affecting labour intensity Y_i of pile foundation work

Номер Number	Наименование фактора Name of the factor	Группа факторов A group of factors
1.1	Тип и параметры свай (заводского изготовления, буронабивные, длина, вес, сечение/диаметр свай, тип основной арматуры) Type and parameters of piles (factory type, boring, length, weight, cross-section/diameter of piles, main type fittings)	1. Технологические факторы Technological factors
1.2	Используемая технология (забивка свай, вдавливание, выполняемые на месте буронабивные) The technology used (pile driving, indentation, on-site drilling)	
1.3	Параметры свайного поля (расстояние, количество и кучность расположения свай) The technology used (pile driving, deepening, on-site drilling)	
1.4	Основные технологические машины (мощность, тип применяемых машин) Main technological machines (power, type of machines used)	
1.5	Техническое обслуживание оборудования (ремонтпригодность на объекте), аварийность Equipment maintenance (maintainability at the facility), accident rate	
1.6	Сложность монтажа и демонтажа оборудования The complexity of installation and disassembly of equipment	
1.7	Сроки выполнения работ (жесткие или гибкие) Deadlines for work (rigid or flexible)	
2.1	Грунтовые условия (уровень грунтовых вод, плотность, состав) Ground conditions (groundwater level, density, composition)	2. Природные факторы Natural factors
2.2	Гидрологические условия площадки строительства (уровень подземных вод) Hydrological conditions of the construction site (groundwater level)	
2.3	Метеорологические условия (изменение погодных условий, ветер, температура, осадки) Meteorological conditions (changes in weather conditions, wind, temperature, precipitation)	
2.4	Неблагоприятные условия и ограничения (наличие и расположение препятствий, над/подземных препятствий) Adverse conditions and restrictions (presence and location of obstacles, above/obstacles)	
2.5	Степень подготовки площадки (подготовительные работы, выемка, расчистка, насыпь) The degree of site preparation (preparatory work, excavation, clearing, embankment)	
2.6	Изменение состояния грунта в процессе выполнения работ Changing the condition of the soil during the work	

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Номер Number	Наименование фактора Name of the factor	Группа факторов A group of factors
3.1	Квалификация рабочей силы Labour force qualifications	3. Человеческие факторы Human factors
3.2	Количество работников (размер бригады, звена и продолжительность смены) Number of employees (team size, link, and shift duration)	
3.3	Рынок труда (наличие рабочих соответствующей квалификации) Labour market (availability of workers with appropriate qualifications)	
3.4	Разработка и использование технологий (новые методы и подходы) Development and use of technologies (new methods and approaches)	
4.1	Качество и доступность основных материалов (бетон, арматура, готовые ж/б сваи) Quality and availability of basic materials (concrete, rebar, ready-made railway piles)	4. Технические факторы Technical instructors
4.2	Механизация процессов Mechanization of processes	
4.3	Наличие необходимого количества техники Availability of the required amount of equipment	
4.4	Потребность в дополнительных исследованиях (геодезических, геотехнических, дополнительные разметка и измерения) The need for additional research (geodetic, geotechnical, additional marking and measurements)	
4.5	Уровень автоматизации процессов (использование современных машин, возможность модернизации) The level of automation of processes (the use of modern machines, the possibility of modernization)	
5.1	Уровень организационного обеспечения (координация работ) The level of organizational support (coordination of work)	5. Организационные факторы Organizational factors
5.2	Методы контроля качества (их количество, этапность) Quality control methods (their number, stages)	
5.3	Неблагоприятные воздействия и ограничения (шум и вибрация) Adverse effects and limitations (noise and vibration)	
5.4	Метод контроля за осадками и деформациями (необходимость в мониторинге) Precipitation and deformation control method (need for monitoring)	
5.5	Стесненность, степень загруженности площадки строительства (возможность выполнения смежных работ) Tightness, the degree of workload of the construction site (the possibility of performing related work)	
5.6	Требования проекта (сложность, вариативность, выбор метода) Project requirements (complexity, variability, choice of method)	
5.7	Наличие подземных коммуникаций и сетей (расположение и их близость) Availability of underground utilities and a set (location and their proximity)	
5.8	Экологические нормы и ограничения (поддержание охраны окружающей среды) Environmental standards and restrictions (maintaining environmental protection)	
5.9	Общие условия безопасности труда (требования охраны труда и здоровья) General occupational safety conditions (occupational health and safety requirements)	
5.10	Статистика и результаты аналогичных проектов (анализ ошибок, выводы) Statistics and results of similar projects (error analysis, conclusions)	
5.11	Логистический (доступность и доставка материалов на площадку) Logistics (availability and delivery of materials to the site)	

производства свайных работ, результаты приведены в табл. 1.

Оценку степени значимости параметров эксперты производят путем присвоения им рангового номера. Фактору, которому эксперт дает наивысшую оценку, присваивается значение 33, фактору наи-

меньшего влияния соответствует значение 1. Если эксперт признает несколько факторов равнозначными, то им присваивается одинаковый ранговый номер. На основе данных анкетного опроса составляется сводная таблица оценки факторов с определением веса и рангов (табл. 2).

Табл. 2. Оценка, определение веса и ранжирование факторов
Table 2. Assessment, weight determination and ranking of factors

Номер Number	Наименование факторов риска Name of risk factors	Эксперты Experts						Σ рангов Σ ranks	Вес фактора Factor weight	Ранжирование Ranking
		1	2	3	4	5	6			
1	Техническое обслуживание оборудования (ремонтотпригодность на объекте), аварийность Equipment maintenance (maintainability at the facility), accident rate	15	22	10	15	10	5	77	0,0230	12
2	Грунтовые условия (плотность, состав) X_1 Soil conditions (density, composition) X_1	32	27	33	33	30	32	187	0,0558	33
3	Сложность монтажа и демонтажа оборудования The complexity of installation and disassembly of equipment	8	14	3	14	2	4	45	0,0134	4
4	Сроки выполнения работ (жесткие или гибкие) Deadlines for work (rigid or flexible)	13	10	11	19	15	3	71	0,0212	10
5	Тип и параметры свай (заводского изготовления, буронабивные, длина, вес, сечение/диаметр свай, тип основной арматуры) X_2 Type and parameters of piles (factory type, boring, length, weight, cross-section/diameter of piles, type of main reinforcement) X_2	33	31	28	32	27	30	181	0,0540	32
6	Основные технологические машины (мощность, тип применяемых машин) Main technological machines (power, type of machines used)	29	21	24	16	19	7	116	0,0346	22
7	Гидрологические условия площадки строительства (уровень подземных вод) Hydrological conditions of the construction site (groundwater level)	5	4	22	24	25	21	101	0,0301	19
8	Квалификация рабочей силы X_3 Labour force qualifications X_3	30	28	32	29	31	29	179	0,0534	31
9	Метеорологические условия (изменение погодных условий в процессе работ, ветер, температура, осадки) Meteorological conditions (changes in weather conditions during work, wind, temperature, precipitation)	19	11	18	23	8	22	101	0,0301	19
10	Используемая технология (забивка свай, вдавливание, выполняемые на месте буронабивные) X_4 The technology used (pile driving, indentation, on-site drilling) X_4	26	33	30	31	29	28	177	0,0528	29
11	Рынок труда (наличие рабочих соответствующей квалификации) Labour market (availability of workers with appropriate qualifications)	10	7	15	13	3	6	54	0,0161	5
12	Разработка и использование технологий (новые методы и подходы) Development and use of technologies (new methods and approaches)	11	5	16	17	4	10	63	0,0188	9
13	Качество и доступность основных материалов (бетон, арматура, готовые ж/б сваи) Quality and availability of basic materials (concrete, rebar, ready-made railway piles)	18	1	1	10	9	17	56	0,0167	6

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Номер Number	Наименование факторов риска Name of risk factors	Эксперты Experts						Σ рангов Σ ranks	Вес фактора Factor weight	Ранжи- рование Ranking
		1	2	3	4	5	6			
14	Механизация процессов Mechanization of processes	22	20	21	20	23	14	120	0,0358	24
15	Наличие необходимого количества техники Availability of the required amount of equipment	24	17	26	26	28	26	147	0,0439	26
16	Потребность в дополнительных исследованиях (геодезических, геотехнических, дополнительные разметка и измерения) The need for additional research (geodetic, geotechnical, additional marking and measurements)	12	6	8	9	7	15	57	0,0170	7
17	Количество работников (размер бригады, звена и продолжительность смены) Number of employees (team size, link, and shift duration)	23	18	5	28	22	12	108	0,0322	21
18	Уровень автоматизации процессов (использование современных машин, возможность модернизации) The level of automation of processes (the use of modern machines, the possibility of modernization)	20	15	7	18	13	16	89	0,0266	16
19	Стесненность, степень загруженности площадки строительства (возможность выполнения смежных работ) X_5 Tightness, the degree of workload of the construction site (the possibility of performing related work) X_5	27	30	29	27	33	31	177	0,0528	29
20	Уровень организационного обеспечения (координация работ) The level of organizational support (coordination of work)	25	26	25	22	14	24	136	0,0406	25
21	Методы контроля качества (их количество, этапность) Quality control methods (their number, stages)	2	16	12	6	20	18	74	0,0221	11
22	Метод контроля за осадками и деформациями (необходимость в мониторинге) Precipitation and deformation control method (need for monitoring)	14	25	20	8	16	11	94	0,0280	17
23	Параметры свайного поля (расстояние, количество и кучность расположения свай) X_6 Pile field parameters (distance, number and accuracy of piles) X_6	28	32	31	21	32	23	167	0,0498	28
24	Требования проекта (сложность, вариативность, выбор метода) Project requirements (complexity, variability, choice of method)	21	24	17	3	26	25	116	0,0346	22
25	Наличие подземных коммуникаций и сетей (расположение и их близость) Availability of underground utilities and networks (location and proximity)	17	7	19	4	24	27	98	0,0292	18
26	Экологические нормы и ограничения (поддержание охраны окружающей среды) Environmental standards and restrictions (maintaining environmental protection)	4	13	14	7	12	9	59	0,0176	8
27	Общие условия безопасности труда (требования охраны труда и здоровья) General occupational safety conditions (occupational health and safety requirements)	16	8	9	11	17	19	80	0,0239	13

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Номер Number	Наименование факторов риска Name of risk factors	Эксперты Experts						Σ рангов Σ ranks	Вес фактора Factor weight	Ранжи- рование Ranking
		1	2	3	4	5	6			
28	Неблагоприятные воздействия и ограничения (шум и вибрация) X_7 Adverse effects and limitations (noise and vibration) X_7	31	29	27	25	21	33	166	0,0495	27
29	Статистика и результаты аналогичных проектов (анализ ошибок, выводы) Statistics and results of similar projects (error analysis, conclusions)	3	2	4	1	8	1	19	0,0057	1
30	Логистический (доступность и доставка материалов на площадку) Logistics (availability and delivery of materials to the site)	7	3	2	5	11	13	41	0,0122	3
31	Наличие осложняющих факторов (наличие и расположение препятствий, над/подземных препятствий) Presence of complicating factors (presence and location of obstacles, above/underground obstacles)	6	19	23	30	5	2	85	0,0254	15
32	Степень подготовки площадки (подготовительные работы, выемка, расчистка, насыпь) The degree of site preparation (preparatory work, excavation, clearing, embankment)	9	12	13	12	18	20	84	0,0251	14
33	Изменение состояния грунта в процессе выполнения работ Changing the condition of the soil during the work	1	9	6	2	1	8	27	0,0081	2

Табл. 3. Значение X_i значимых факторов на трудоемкость свайных работ
Table 3. The significance of X_i significant factors on the complexity of pile work

Обозначение фактора Designation of the factor	Наименование значимых факторов (см. табл. 2) Naming of significant factors (see Table 2)
X_1	Грунтовые условия Ground conditions
X_2	Тип и параметры свай Type and parameters of piles
X_3	Квалификация рабочей силы Labour force qualifications
X_4	Используемая технология The technology used
X_5	Стесненность Tightness
X_6	Параметры свайного поля Pile field parameters
X_7	Неблагоприятные воздействия и ограничения Adverse impacts and constraints

На основании оценок определен вес каждого фактора, произведено ранжирование, выделены 7 наиболее значимых факторов (X_1 – X_7), оказывающих наибольшее влияние на результирующий показатель Y_i (табл. 3).
Представленные в табл. 3 наиболее значимые факторы (грунтовые условия X_1 , тип и параметры

свай X_2 , квалификация рабочей силы X_3 , используемая технология X_4 , стесненность X_5 , параметры свайного поля X_6 , неблагоприятные воздействия и ограничения X_7) группируются в матрице (табл. 4) с учетом конкретных условий для каждого сочетания 1 и 2 групп.

Табл. 4. Матрица группировки факторов (X_1 – X_7) в зависимости от параметров 1 и 2 групп условий строительства
Table 4. Matrix of grouping factors (X_1 – X_7), depending on the parameters of groups 1 and 2 of construction conditions

1. Группа условий «По типу участка строительства» Group of conditions "By type of construction site"	Застройка исторического характера Historical buildings	1.3	Грунтовые условия Ground conditions	Грунтовые условия Ground conditions	Грунтовые условия Ground conditions
			–	–	Тип и параметры свай Type and parameters of piles
			Квалификация рабочей силы Labour force qualifications	Квалификация рабочей силы Labour force qualifications	Квалификация рабочей силы Labour force qualifications
			Используемая технология The technology used	Используемая технология The technology used	Используемая технология The technology used
			Стесненность Tightness	Стесненность Tightness	Стесненность Tightness
			–	–	Параметры свайного поля Pile field Parameters
			Неблагоприятные воздействия Adverse impacts	–	Неблагоприятные воздействия Adverse impacts
	Новое строительство New construction	1.2	Грунтовые условия Ground conditions	Грунтовые условия Ground conditions	Грунтовые условия Ground conditions
			–	–	Тип и параметры свай Type and parameters of piles
			Квалификация рабочей силы Labour force qualifications	Квалификация рабочей силы Labour force qualifications	Квалификация рабочей силы Labour force qualifications
			Используемая технология The technology used	Используемая технология The technology used	Используемая технология The technology used
			–	–	–
			–	–	Параметры свайного поля Pile field parameters
			Неблагоприятные воздействия Adverse impacts	–	–

Окончание табл. 4 / End of the Table 4

1. Группа условий «По типу участка строительства» Group of conditions “By type of construction site”	Застроенный квартал Built-up area	1.1	Грунтовые условия Ground conditions	Грунтовые условия Ground conditions	Грунтовые условия Ground conditions
			Тип и параметры свай Type and parameters of piles	—	Тип и параметры свай Type and parameters of piles
			Квалификация рабочей силы Labour force qualifications	Квалификация рабочей силы Labour force qualification	Квалификация рабочей силы Labour force qualifications
			Используемая технология The technology used	Используемая технология The technology used	Используемая технология The technology used
			Стесненность Tightness	—	Стесненность Tightness
			—	—	Параметры свайного поля Pile field parameters
			Неблагоприятные воздействия Adverse impacts	—	Неблагоприятные воздействия Adverse impacts
		2. Группа условий «По технологии устройства свайного фундамента» Group of conditions “According to the technology of pile foundation construction”			
		2.1	2.2	2.3	
		Забивкой By clogging	Вдавливанием By indentation	Выполняемые на месте (буронабивные) Performed on site (drilling)	

Оценка средней степени согласованности мнений всех экспертов, тесноты связи между ранжируемыми факторами производится с помощью коэффициента конкордации W Кендалла (1, 2).

Каждому фактору присваивается значение [19] по формуле:

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2 \cdot (n^3 - n) - m \sum T_i^2}, \tag{1}$$

где S — общая сумма квадратов отклонений суммы рангов от средней арифметической суммы рангов:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2; \tag{2}$$
$$T_i = \frac{1}{12} \sum (t_i^3 - t_i),$$

где m — количество экспертов; n — количество ранжируемых факторов; μ — среднее арифметическое; t_i — количество повторяющихся элементов в оценках i -го эксперта (отсутствует, $T_i = 0$).

В результате расчетов коэффициент конкордации W равен 0,705. Значение коэффициента $W > 0,6-0,8$, что свидетельствует о хорошем качестве оценки, согласованность мнений экспертов сильная. Проверим значимость коэффициента конкордации с помощью критерия χ^2 Пирсона:

$$\chi^2 = Wm(n - 1). \tag{3}$$

Полученное значение $\chi^2 = 135,312$ сравним с критическим табличным значением критерия Пирсона $\chi^2_{кр}$ при уровне значимости $p = 0,05$ и числе степеней свободы 32 ($\chi^2_{кр} = 46,196$). Значение $\chi^2 > \chi^2_{кр}$

(135,312 > 46,194), следовательно, зависимость статистически значима, уровень значимости данной взаимосвязи соответствует значению $p < 0,05$.

Наличие числовых данных [21] и содержательных высказываний экспертов приводит к необходимости введения количественной оценки значимых факторов. Бальная шкала от 1 до 3, где 1 — низкая сложность; 2 — средняя сложность; 3 — высокая сложность; дает возможность сформировать общее представление, объединяя как качественные, так и количественные показатели.

Поведение отдельных переменных контролировать невозможно, так как не удастся обеспечить равенство всех прочих условий для оценки влияния одного исследуемого фактора. В этом случае следует выявить влияние других факторов, введя их в модель, т.е. построить уравнение множественной регрессии.

По десяти объектам, расположенным на различных участках строительства, и примененным методам устройства свайных оснований по шкале от 1 до 3 были оценены ключевые факторы. В результате использования простого с вычислительной точки зрения и теоретически обоснованного метода нахождения неизвестных параметров ($b_1, b_2, \dots, b_k$) методом наименьших квадратов (МНК) [22] будет построено множественное уравнение линейной регрессии:

$$Y = f(b, x) + \varepsilon, \tag{4}$$

где Y — зависимая (объясняемая) переменная; $X = (X_1, X_2, \dots, X_m)$ — вектор независимых (объясняющих) переменных; ε — случайная величина (воз-

мушение или остаток), который отражает влияние случайных ошибок, особенностей измерений и действий, оказывающих влияние на результирующую переменную, других объясняющих переменных, которые не были включены в уравнение.

Наилучший результат регрессионного анализа по методу МНК возможно получить при обязательном выполнении определенных условий (условия Гаусса – Маркова).

МНК позволяет получить такие оценки параметров, при которых сумма квадратов отклонений фактических значений результирующего признака y от расчетных y минимальна, выполняется по формуле:

$$\sum_i (y_i - y_{x_i}) \rightarrow \min. \tag{5}$$

Как известно из курса математического анализа [8, 9], для того чтобы найти экстремум функции нескольких переменных надо вычислить частные производные первого порядка по каждому из параметров и приравнять их к нулю. После элементарных преобразований приходим к системе линейных нормальных уравнений для нахождения параметров линейного уравнения множественной регрессии.

Также для расчета параметров уравнения регрессии и проверки его адекватности исследуемому процессу в ряде современных вычислительных программных продуктов реализована функция Регрессия (=ЛИНЕЙН;=МУМНОЖ(МОБР(массив 1);массив 2)) в пакете статистического анализа [23, 24]. Практическая значимость полученного результата оценена по показателям множественной корреляции и детерминации, частных коэффициентов эластичности. Полученные значения представлены ниже:

- 1. TSS = 0,861 (сумма квадратов относительно среднего $\bar{Y}$ (общая)).
- 2. RSS = 0,83 (сумма квадратов, обусловленная регрессией (объясненная)).
- 3. ESS = 0,028 (сумма квадратов относительно регрессии (необъясненная, остаток)).
- 4. $R^2 = 0,9762$ (коэффициент детерминации).
- 5. $R = 0,983$ (коэффициент множественной корреляции).
- 6. $F_{\text{стат}} = 249,45$ (критерий Фишера).
- 7. Θ_i — коэффициенты эластичности, значение по модулю (табл. 5).

Проведенное исследование методом экспертных оценок среди 33 факторов выявило 7 наиболее весомых и значимых. В результате ранжирования для 10 объектов, согласно количественной шкале, был присвоен оценочный балл, определяющий трудо-

емкость работ для определенного значимого фактора (табл. 6).

Аналитические оценки каждого фактора сведены в табличную форму, и в результате расчетов методом наименьших квадратов получены коэффициенты по каждому фактору для формирования окончательного уравнения множественной регрессии. Значения коэффициентов приведены в табл. 7.

Подставив значения, получаем уравнение множественной регрессии:

$$Y_x = 0,1085x_1 + 0,1214x_2 + 0,0053x_3 - 0,1662x_4 + 0,28x_5 + 0,17x_6 + 0,16x_7 - 0,9214. \tag{6}$$

Проверку полученных значений производим по выполнению равенства:

$$TSS = RSS + ESS = 0,83 + 0,028 = 0,861.$$

Значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,9762$, а также сравнение $F_{\text{стат}}$ (критерий Фишера) = 249,45 > $F_{\text{крит}} = 19,35$ (нулевая гипотеза отклонена) указывают на то, что уравнение регрессии статистически значимо и может использоваться для прогнозирования трудоемкости устройства свайных оснований современными методами в зависимости от расположения участка строительства при уровне значимости $p = 0,05$.

Выборочный коэффициент множественной корреляции $R = 0,983$ находится в диапазоне $0,7 \leq |0,9834| \leq 1,0$, что свидетельствует о сильной тесноте линейной связи.

На основании стандартизованных коэффициентов и коэффициентов эластичности наименьший вклад (изменение фактора меньше влияет на изменение исследуемой переменной) в уравнение регрессии вносит переменная X_3 .

Рассмотренное исследование и его результаты относились в равной степени ко всем трем способам погружения свай: забивкой, буронабивным и вдавливанием. Проводя в последующем их сравнительную оценку, при прочих равных параметрах установлено, что несомненным преимуществом обладает способ вдавливанием (рис. 2, табл. 8).

К преимуществам этого способа относятся в том числе: экономия времени, высокая несущая способность свайного поля (за счет уплотнения грунта по граням свай), бесшумный процесс, экономия на материалах, долговечность, возможность применения на разных грунтах, возможность не повреждать структуру грунтов вблизи расположенных зданий.

Рассматривая данный метод в качестве эффективного варианта погружения свай, далее представлены параметры и характеристики оборудования и свай

Табл. 5. Коэффициенты эластичности Θ_i , значение по модулю

Table 5. Elasticity coefficients E_i , modulo

Θ_1 E_1	Θ_2 E_2	Θ_3 E_3	Θ_4 E_4	Θ_5 E_5	Θ_6 E_6	Θ_7 E_7
0,554251	0,593851	0,022715	0,707200	0,99886	0,769591	0,728250

Табл. 6. Ранжирование значимых факторов X_1-X_5 по количественной шкале
Table 6. Ranking of significant factors X_1-X_5 on a quantitative scale

Наименование фактора Name of the factor	Оценочный балл Estimated score		
	1	2	3
	Низкий Low	Средний Average	Высокий High
Грунтовые условия X_1 Ground conditions X_1	Требуются минимальные усилия и менее мощная техника для установки свай, грунты, обладающие низкой несущей способностью Minimal effort and less powerful machinery are required to install piles, soils with low bearing capacity	Требуется применение специализированной техники, не каждая технология без предварительных мероприятий (бурение скважин) применима. Грунты обладают средней водопроницаемостью и несущей способностью. Они могут обеспечивать хорошую поддержку The use of specialized equipment is required, not every technology is applicable without preliminary measures (drilling wells). Soils have medium water permeability and load-bearing capacity. They can provide good support for buildings and structures	Требуется применение специализированной техники высокой мощности, может возникнуть необходимость в предварительном бурении. Грунты имеют низкую водопроницаемость (подвержены значительным деформациям при изменении содержания влаги) и высокую несущую способность The use of specialized high-power equipment is required, and preliminary drilling may be necessary. Soils have low water permeability (subject to significant deformations when the moisture content changes) and high load-bearing capacity
Тип и параметры свай X_2 Type and parameters of piles X_2	Заводского изготовления, небольшого сечения, длины и массы Factory-made, small cross-section, length and weight	Заводского изготовления составные, имеющие длину, сравнимую со сваями, изготавливаемыми на месте Factory-made composite piles having a length comparable to piles manufactured on site	То же с увеличенным сечением/диаметром, длиной, требующими индивидуальных чертежей для заводского изготовления или специализированной техники Also, with an increased cross-section/ diameter, long, requiring individual drawings for factory manufacture or specialized equipment
Квалификация рабочих силы X_3 Labour force qualifications X_3	Отсутствует опыт работы или имеется не по профилю, нет образования по специальности There is no work experience or there is not a profile, there is no education in the specialty	Опыт работы имеется в сфере строительства от 1–3 лет, наличие высшего/среднего специального образования Work experience is available in the field of construction from 1–3 years, higher/secondary specialized education	Опыт работы имеется в специализированных работах от 3–5 лет, наличие высшего/среднего специального образования Work experience is available in specialized jobs from 3–5 years, higher/secondary specialized education
Используемая технология X_4 The technology used X_4	Ограниченно (крайне редко) применяется — специализированно Limited (extremely rare) use — specialized	Применяема при определенных несущественных условиях It is used under certain non-essential conditions	Активно (массово) применяется — практически универсальна Actively (massively) used — practically universal
Степень загруженности площадки X_5 Tightness, the degree of site congestion X_5	Отсутствуют ограничения в расположении и передвижении техники и оборудования. Нет соседствующих зданий и сооружений There are no restrictions on the location and movement of machinery and equipment. There are no adjacent buildings or structures	Имеются ограничения по площадке, учитывается влияние соседних зданий и сооружений (возможны компенсирующие мероприятия) There are restrictions on the site, the influence of neighboring buildings and structures is taken into account (compensatory measures are possible)	Плотная застройка, близость к зданиям и сооружениям (работа с сохранением фасадов зданий, открытых парковок и т.д.), невозможность переноса сооружений, необходимость компенсирующих мероприятий обязательна Dense buildings, proximity to buildings and structures (work with the preservation of building facades, open Parking lots, etc.), the impossibility of transferring structures, the need for compensatory measures is mandatory

Окончание табл. 6 / End of the Table 6

Наименование фактора Name of the factor	Оценочный балл Estimated score		
	1	2	3
	Низкий Low	Средний Average	Высокий High
Параметры свайного поля X_6 Parameters of the pile field X_6	Расположено в виде сплошного свайного поля, с сохранением порядка, предусмотренного нормативными документами It is located in the form of a continuous pile field, while maintaining the order provided for by regulatory documents	То же, включая расположения в виде лент свайных кустов или увеличенным количеством свай в определенных местах (кучности) Also, including arrangements in the form of ribbons and a small number of individual pile bushes or an increased number of piles in certain places (piles)	«Хаотичное» расположение свай в свайном поле/расположение свай в свайных кустах с существенным расстоянием между ними и/или кучном расположении свай “Chaotic” arrangement of piles in a pile field/arrangement of piles in pile bushes with a significant distance between them and or pile arrangement of piles
Неблагоприятные воздействия и ограничения X_7 Adverse impacts and constraints X_7	Полное и/или частичное отсутствие воздействия от техники и деятельности на строительной площадке Total and/or partial absence of impact from machinery and activities on the construction site	Незначительное воздействие на окружающие здания, сооружения, человека и окружающую среду. Нормализация по средствам компенсирующих мероприятий Total and/or partial absence of impact from machinery and activities on the construction site	Существенное воздействие машин, механизмов на окружающие здания, сооружения, человека и окружающую среду процессами производства строительных работ. Невозможность снизить/исключить влияние компенсирующими мероприятиями Significant impact of machines, mechanisms, and the environment the surrounding buildings, structures, humans, and the environment during construction work. It is not possible to reduce/eliminate the impact of compensatory measures

Табл. 7. Аналитические оценки факторов X_1 – X_7
Table 7. Analytical estimates of factors X_1 – X_7

a	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
–0,9214	0,1085	0,1214	0,0053	–0,1662	0,28	0,17	0,16

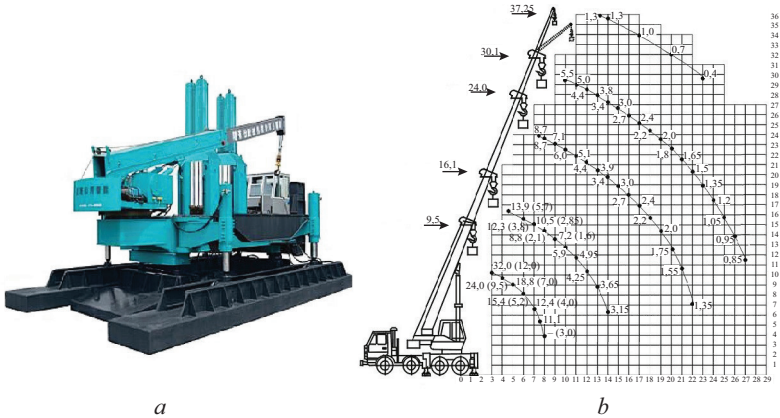


Рис. 2. Применяемое в процессе исследования оборудование [11]: *a* — сваевдавливающая установка SUNWARD (КНР), марка ZYJ360; габаритные размеры: длина — 12 000 мм; ширина — 6550 мм; *b* — автокран КС-55729-1; грузоподъемность — 25 т; длина стрелы — 9,5–30,1 м; длина гуська — 7,15 м; вес крана — 30 т; габариты машины 12 × 2,5 × 3,75

Fig. 2. The equipment used in the research process is the SUNWARD pile crushing plant truck crane SUNWARD pile crushing plant (China); overall dimensions: length 12,000 mm; width 6,550 mm; KS-55729-1 truck crane; load capacity — 25 tons; the length of the boom is 9.5–30.1 m; the length of the track is 7.15 m; the crane’s weight is 30 tons; the dimensions of the machine are 12 × 2.5 × 3.75

(рис. 2, табл. 8), которые часто применяются при выполнении свайных работ в г. Санкт-Петербурге.

При погружении свай консолью максимальное усилие вдавливания составляет 120/150 т для сваевдавливающей установки (СВУ) 240/360. При этом минимальное расстояние от границы установки до существующих стен или иных преград должно составлять не менее 1,5 м.

Принцип работы сваевдавливающей установки заключается в том, что в процессе вдавливания сваи вес машины действует как противодействующая сила для баланса между сопротивлением трения вдавливаемой сваи и силой реакции хвостовика сваи, затем свая вдавливается в грунт.

Предлагаемая оптимизированная структурно-технологическая модель статического вдавливания свай включает следующие этапы:

1. Производится установка первой (нижней сваи) в вертикальном положении при помощи кра-

новой лебедки, установленной на сваевдавливающей машине. Далее через систему четырех зажимов в агрегате передается давление на сваю через систему блоков, за счет чего свая погружается в грунт.

2. Когда нижняя часть сваи достигает глубины на отметке 1,0 м от поверхности земли, погружение останавливается и при помощи кранового оборудования на агрегате устанавливают следующую часть составной сваи.

3. Верхняя и нижняя части составных свай стыкуются между собой накладками Н2 с проваркой по всему периметру (в круг) в рабочем положении сваи в соответствии с проектом электродами УОНИИ 13/55 3,0 (4,0) × 450.

4. Выполняется антикоррозионная обработка сварных соединений составных свай. Обработка производится цинконаполненной композицией на основе высокомолекулярного синтетического полимера или аналогом.

Табл. 8. Технические параметры свай [7]
Table 8. Technical parameters of piles [7]

Наименование Name	Марка Stamp	Количество Quantity	Масса ед., т Mass of units, tons	Применяемое оборудование Equipment used
Свая ж/б Reinforced concrete pile	C100.35-6	302	3,06	1. Сваевдавливающая установка SUNWARD ZYJ360 The SUNWARD ZYJ360 pile crushing plant. 2. Автокран КС-55729-1 Truck crane KS-55729-1
	C110.35-6	248	3,36	
	C120.35-6	5	3,67	
	C130.35-6	5	3,98	
	C120.35-5	560	3,68	

5. После устройства сварного стыка и антикоррозийной обработки составную сваю продолжают вдавливать в автоматическом режиме работы установки. Вдавливание сваи прекращают, когда оголовок сваи достигнет уровня поверхности земли. Затем при помощи агрегатного крана устанавливают короткую сваю (вспомогательную) и продолжают вдавливание, достигнув проектной отметки, погружение прекращают, агрегат переезжает на новую позицию.

Разбивка на местности свайного поля проводится в соответствии с координатами, нанесенными на проекте свайного поля. Перенос на местность свайного поля осуществляется при помощи тахеометра Leica FlexLine TS06 plus R500 5" с привязкой к местности через светоотражающие марки, расположенные на близлежащих зданиях. Независимо от метода разбивки свайного поля вначале переносятся и закрепляются на местности две основные точки оси. Выполнение разбивки свайного поля на строительном участке проводится на основании координат, заданных в проекте, а перенос на участок может производиться с использованием тахеометра Leica FlexLine TS06 plus R500 5" через привязку к территории с использованием светоотражающих маркеров, которые могут быть расположены на ближайших строениях. Вначале в независимости от способа разбивки свайного поля размещаются две крайние точки оси.

Они закрепляются в натуре путем вдавливания на 15–25 см деревянных кольев или стальных стержней длиной 30–40 см. По прибытии и сборке сваевдавливательной установки на объект производится обмер габаритов СВУ и калибровка спутниковых тарелок (GPS и ГЛОНАСС), расположенных на корпусе. Калибровка и позиционирование проходит по центру сваезажимного короба сваевдавливательной установки. Наличие двух систем спутниковой навигации минимизирует возможные отклонения при разбивке.

Геодетическая служба запишет ранее созданный файл (формат *.dxf) с нанесенными центрами свай по переданной рабочей документации свайного поля в планшетный компьютер системы Drill Control, установленный в кабине машиниста СВУ. При запуске планшетного компьютера машинист СВУ увидит свайное поле с нанесенными центрами свай и расстояние от откалиброванного центра сваезажимного короба до центра выбранной для погружения сваи с точностью до 1 см. Машинист перемещает сваевдавливательную установку к погружаемой

свае до полного совмещения центра сваезажимного короба с центром погружаемой сваи, размеченной на свайном поле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель (формула (6)) по оценке трудоемкости Y_i при устройстве свайных фундаментов позволяет выявить характер влияния значимых факторов на результирующий показатель Y_i . При этом наибольшее влияние будут оказывать показатели:

- $X_5 = 0,28$ — это показатель «Стесненность, степень загруженности площадки строительства, возможность выполнения смежных работ»;
- $X_6 = 0,17$ — показатель «Параметры свайного поля»: расстояние, количество и кучность расположения свай.

Другие показатели влияют в меньшей степени, что возможно оценить по формуле (6):

$$Y_x = 0,1085x_1 + 0,1214x_2 + 0,0053x_3 - 0,1662x_4 + 0,28x_5 + 0,17x_6 + 0,16x_7 - 0,9214.$$

Сформированное уравнение регрессии позволяет сделать вывод, что на эффективность выполнения свайных работ будут влиять факторы из таких групп (табл. 1 и 2), как: технологические, организационные, природные и человеческие факторы (грунтовые условия — X_1 , тип и параметры свай — X_2 , квалификация рабочей силы — X_3 , используемая технология — X_4 , стесненность — X_5 , параметры свайного поля — X_6 , неблагоприятные воздействия и ограничения — X_7).

В качестве наиболее рационального и универсального по совокупности преимуществ в исследовании принят метод вдавливания свай с дополненной в данном исследовании технологией производства этого вида работ.

Научная новизна полученных результатов заключается в:

- выявлении, исследовании и группировании наиболее значимых факторов, влияющих на эффективность свайных работ;
- построении математической модели (уравнения регрессии), позволяющей комплексно учесть степень влияния каждого фактора на результирующий показатель Y_i (трудозатраты);
- возможности эффективного планирования технологии свайных работ с учетом значимых факторов и выполнения работ в различных локациях расположения участка строительства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Барыкин А.Б., Барыкин Б.Ю., Зеленин Е.В. Разработка методики расчета перекрестно-балочного фундамента на наклонном основании, осложненного карстово-провальными процессами // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 9. С. 1494–1504. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1494-1504. EDN WZAJWJ.
2. Клюев В.Д., Щепанский С.Б., Панаева В.В., Зайцев Д.А. Производительность труда в строительной отрасли и методы ее измерения // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2022. № 1 (33). С. 89–94. EDN KYUABY.
3. Ланидус А.А., Щукин А.Ю. Применение функционально ориентированных систем моделирования при осуществлении строительного контроля // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 10. С. 1666–1675. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1666-1675. EDN BUZMCQ.
4. Пиеничкина В.А., Иванов С.Ю., Рекунов С.С., Чураков А.А. Влияние соотношения жесткостей здания и многослойного грунтового основания на сейсмический отклик системы // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 2. С. 231–245. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.231-245. EDN JDNOYA.
5. Ланидус А.А. Метод повышения производительности труда в строительстве // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 8. С. 1365–1372. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1365-1372. EDN FANXKA.
6. Пиеничкина В.А., Рекунов С.С., Иванов С.Ю. Вероятностный анализ динамических характеристик системы «сооружение – слоистое основание» // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 8 (788). С. 32–43. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-32-43. EDN XZEYVI.
7. Пиеничкина В.А., Рекунов С.С., Иванов С.Ю., Жиденко А.С., Чанчан М., Хамиси С. Сравнительный анализ результатов расчета системы «здание – основание», представленной в виде слоистой модели // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. № 1 (90). С. 43–53. EDN ELCFWD.
8. Ромаданова М.М., Вагер Б.Г. Методы обработки экспериментальных данных при моделировании геофизических процессов // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2 (38). С. 70–75. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-70-75. EDN UYRVTC.
9. Сафарян Г.Б. Критический анализ обобщенной модели строительной системы // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11. № 4. С. 41–47. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.4.4. EDN PFGTCK.
10. Верстов В.В., Гайдо А.Н., Иванов Я.В. Технологии устройства ограждений котлованов в условиях городской застройки и акваторий. СПб. : Лань, 2014. 365 с.
11. Ушаков Л.С., Котылев Ю.Е., Кравченко В.А. Гидравлические машины ударного действия. М. : Машиностроение, 2000. 415 с.
12. Abdulaziz M.A., Hamood M.J., Fattah M.Y. A review study on seismic behavior of individual and adjacent structures considering the soil — Structure interaction // Structures. 2023. Vol. 52. Pp. 348–369. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.03.186
13. Cheng X.X., Zhao L., Ge Y.J., Dong J., Peng Y. Full-Scale/Model Test Comparisons to Validate the Traditional Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel Tests : Literature Review and Personal Perspectives // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. Issue 2. P. 782. DOI: 10.3390/app14020782
14. Kiseleva E.V., Dambiev T.B., Stepanets V.E., Valkova S.S. Building Functional Diagram of Cargo Delivery to Describe and Research Processes in Freight Forwarding Company based on the IDEFO Standard (SADT) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 988. Issue 2. P. 022060. DOI: 10.1088/1755-1315/988/2/022060
15. Messaoudi A., Mezouar N., Hadid M., Laouami N. Effects of soil heterogeneities on its seismic responses // Lecture Notes in Civil Engineering. 2024. Pp. 221–232. DOI: 10.1007/978-3-031-57357-6_19
16. Requena-Garcia-Cruz M.V., Bento R., Durand-Neyra P., Morales-Esteban A. Analysis of the soil structure-interaction effects on the seismic vulnerability of mid-rise RC buildings in Lisbon // Structures. 2022. Vol. 38. Pp. 599–617. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.02.024
17. Sadek M., Hussein M., Chehade F.H., Arab A. Influence of soil–structure interaction on the fundamental frequency of shear wall structures // Arabian Journal of Geosciences. 2020. Vol. 13. Issue 17. DOI: 10.1007/s12517-020-05872-z
18. Shao X., Ning J., Tang R., Fang Z., Zhao B., Xu B. et al. Effect of temperature-rising inhibitor on the hydration and performance of cemented paste-filling material // Case Studies in Construction Materials. 2023. Vol. 19. P. e02680. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02680
19. Liang T., Luo P., Mao Z., Huang X., Deng M., Tang M. Effect of Hydration Temperature Rise Inhibitor on the Temperature Rise of Concrete and Its Mechanism // Materials. 2023. Vol. 16. Issue 8. P. 2992. DOI: 10.3390/ma16082992
20. Ланидус А.А. Организационно-технологическая платформа строительства // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 4. С. 516–524. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.516-524. EDN BMHWDX.
21. Саиян С.Г., Шелетина В.Б. Применение методов машинного обучения для прогнозирования аэродинамических коэффициентов давления на здания и сооружения прямоугольных форм // Вестник МГСУ.

2025. Т. 20. № 3. С. 381–393. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.381-393. EDN OPWJDE.

22. Alanani M., Elshaer A. ANN-based optimization framework for the design of wind load resisting system of tall buildings // *Engineering Structures*. 2023. Vol. 285. P. 116032. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116032

23. Bapir B., Abrahamczyk L., Wichtmann T., Prada-Sarmiento L.F. Soil-structure interaction: A state-of-

the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures // *Frontiers in Built Environment*. 2023. Vol. 9. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1120351

24. Berkane H.D., Harichane Z., Guellil M.E., Sadouki A. Investigation of Soil Layers Stochasticity Effects on the Spatially Varying Seismic Response Spectra // *Indian Geotechnical Journal*. 2019. Vol. 49. Issue 2. Pp. 151–160. DOI: 10.1007/s40098-018-0301-y

Поступила в редакцию 19 апреля 2025 г.

Принята в доработанном виде 7 июня 2025 г.

Одобрена для публикации 7 июня 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Алексеевич Руденко — кандидат технических наук, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры организации строительства; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4; РИНЦ ID: 664021, Scopus: 57224505043, ResearcherID: ABA-8121-2021, ORCID: 0009-0008-2338-0102; rudenkoa.a@mail.ru;

Сергей Викторович Сазонов — аспирант кафедры организации строительства; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4; sazonov_sv@inbox.ru.

Вклад авторов:

Руденко А.А. — идея, планирование исследований, уточнение и дополнение факторов исследования, научное руководство, итоговое редактирование, обоснование результатов, дополнение текста.

Сазонов С.В. — подбор исходных данные, подготовка исходного текста, расчет.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Barykin A.B., Barykin B.Yu., Zelenin E.V. Development of the calculation methodology of cross-beam foundation on the sloping base complicated by karst and sinkhole processes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1494-1504. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1494-1504. EDN WZAJWJ. (rus.).

2. Klyuev V.D., Shchepansky S.B., Panayetova V.V., Zaitsev D.A. Analysis of the results of the implementation of the programs of the centers of competence of the national technology initiative for the first stage of its implementation. *Innovatics and Expert Examination*. 2022; 1(33):89-94. EDN KYUABY. (rus.).

3. Lapidus A.A., Shchukin A.Yu. Application of function-oriented modelling systems in construction control implementation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(10):1666-1675. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1666-1675. EDN BUZMCQ. (rus.).

4. Pshenichkina V.A., Ivanov S.Yu., Rekunov S.S., Churakov A.A. Influence of the stiffness ratio of the building and the multilayer soil foundation on the seismic response of the system. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(2):231-245. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.231-245. EDN JDNOYA. (rus.).

5. Lapidus A.A. A method of increasing labour productivity in construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1365-1372. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1365-1372. EDN FAHXKA. (rus.).

6. Pshenichkina V.A., Rekunov S.S., Ivanov S.Yu. Probabilistic analysis of dynamic characteristics of the “structure – layered foundation” system. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024; 8(788):32-43. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-32-43. EDN XZEYVI. (rus.).

7. Pshenichkina V.A., Rekunov S.S., Ivanov S.Yu., Zhidenko A.S., Tchanchane M., Hamici S. Comparative analysis of the calculation results of the building-base system presented in the form of a layered model. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. The Construction and Architecture*. 2023; 1(90):43-53. EDN ELCFWD. (rus.).

8. Romadanova M.M., Vager B.G. Methods for processing experimental data in modeling geophysical processes. *Systems. Methods. Technologies*. 2018; 2(38):70-75. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-70-75. EDN UYRVTC. (rus.).

9. Safaryan G.B. A generalized model of a building system : a critical analysis. *Construction: Science*

and Education. 2021; 11(4):41-47. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.4.4. EDN PFGTCK. (rus.).

10. Verstov V.V., Gaido A.N., Ivanov Ya.V. *Technologies for the construction of pit fencing in urban areas and water areas*. St. Petersburg, Lan, 2014; 365. (rus.).

11. Ushakov L.S., Kotylev Yu.E., Kravchenko V.A. *Hydraulic impact machines*. Moscow, Mashinostroenie, 2000; 415. (rus.).

12. Abdulaziz M.A., Hamood M.J., Fattah M.Y. A review study on seismic behavior of individual and adjacent structures considering the soil — Structure interaction. *Structures*. 2023; 52:348-369. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.03.186

13. Cheng X.X., Zhao L., Ge Y.J., Dong J., Peng Y. Full-Scale/Model Test Comparisons to Validate the Traditional Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel Tests : Literature Review and Personal Perspectives. *Applied Sciences*. 2024; 14(2):782. DOI: 10.3390/app14020782

14. Kiseleva E.V., Dambiev T.B., Stepanets V.E., Valkova S.S. Building Functional Diagram of Cargo Delivery to Describe and Research Processes in Freight Forwarding Company based on the IDEFO Standard (SADT). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 988(2):022060. DOI: 10.1088/1755-1315/988/2/022060

15. Messaoudi A., Mezouar N., Hadid M., Laouami N. Effects of soil heterogeneities on its seismic responses. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024; 221-232. DOI: 10.1007/978-3-031-57357-6_19

16. Requena-Garcia-Cruz M.V., Bento R., Durand-Neyra P., Morales-Esteban A. Analysis of the soil structure-interaction effects on the seismic vulnerability of mid-rise RC buildings in Lisbon. *Structures*. 2022; 38:599-617. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.02.024

17. Sadek M., Hussein M., Chehade F.H., Arab A. Influence of soil–structure interaction on the fundamental frequency of shear wall structures. *Arabian*

Journal of Geosciences. 2020; 13(17). DOI: 10.1007/s12517-020-05872-z

18. Shao X., Ning J., Tang R., Fang Z., Zhao B., Xu B. et al. Effect of temperature-rising inhibitor on the hydration and performance of cemented paste-filling material. *Case Studies in Construction Materials*. 2023; 19:e02680. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02680

19. Liang T., Luo P., Mao Z., Huang X., Deng M., Tang M. Effect of Hydration Temperature Rise Inhibitor on the Temperature Rise of Concrete and Its Mechanism. *Materials*. 2023; 16(8):2992. DOI: 10.3390/ma16082992

20. Lapidus A.A. Organizational and technological platform of construction. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(4):516-524. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.516-524. EDN BMHWDX. (rus.).

21. Saiyan S.G., Shelepina V.B. Application of machine learning methods to predict aerodynamic pressure coefficients on rectangular buildings and structures. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2025; 20(3):381-393. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.381-393. EDN OPWJDE. (rus.).

22. Alanani M., Elshaer A. ANN-based optimization framework for the design of wind load resisting system of tall buildings. *Engineering Structures*. 2023; 285:116032. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116032

23. Bapir B., Abrahameczyk L., Wichtmann T., Prada-Sarmiento L.F. Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures. *Frontiers in Built Environment*. 2023; 9. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1120351

24. Berkane H.D., Harichane Z., Guellil M.E., Sadouki A. Investigation of Soil Layers Stochasticity Effects on the Spatially Varying Seismic Response Spectra. *Indian Geotechnical Journal*. 2019; 49(2):151-160. DOI: 10.1007/s40098-018-0301-y

Received April 19, 2025.

Adopted in revised form on June 7, 2025.

Approved for publication on June 7, 2025.

BIONOTES: **Aleksandr A. Rudenko** — Candidate of Technical Sciences, Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department of Construction Organization; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 190005, Saint Petersburg, Russian Federation; ID RSCI: 664021, Scopus: 57224505043, ResearcherID: ABA-8121-2021, ORCID: 0009-0008-2338-0102; rudenkoa.a@mail.ru;

Sergey V. Sazonov — postgraduate student of the Department of Construction Organization; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 190005, Saint Petersburg, Russian Federation; sazonov_sv@inbox.ru.

Contribution of the authors:

Aleksandr A. Rudenko — idea, research planning, refinement and addition of research factors, scientific management, final editing, substantiation of the results, addition of the text.

Sergey V. Sazonov — selection of initial data, preparation of the initial text, calculation.

The authors declare no conflict of interest.

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ / REVIEW PAPER

УДК 69.003.13

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1419-1430

Анализ технологий бережливого строительства в условиях цифровой трансформации отрасли

Татьяна Сергеевна Мещерякова¹, Виктор Владимирович Кутузов²

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

² Белорусско-Российский университет; г. Могилев, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Строительные компании во всем мире стремятся внедрять инструменты комплексной оптимизации своих бизнес-процессов, при этом перенимая принципы бережливого производства, развитие которых находит отражение в технологиях бережливого строительства. В рамках такого инструментария рассматриваются вопросы как организационного, так и технологического порядка, ориентированные на сокращение или локализацию потерь, улучшение координационного взаимодействия между субъектами строительного процесса, достигаемого в условиях цифровой среды.

Материалы и методы. Изучены научные статьи по тематике бережливого строительства российских и зарубежных ученых, отраженных в библиографическом каталоге научных работ OpenAlex и ResearchGate, использованы данные исторического кейса строительства четвертого энергоблока Калининской АЭС, а также проанализированы отдельные публичные документы органов власти Российской Федерации и Республики Беларусь. Применялись следующие научные методы исследования: исторический анализ; синтез; обобщение и формализация, позволившие сформировать комплекс инструментов и определить подходы к реализации технологий бережливого строительства.

Результаты. Разрешение противоречий и оптимизация процессов по предметной области исследования выстраиваются с учетом доступных технологий бережливого строительства, которые должны быть интегрированы в текущую деятельность организации при условии их доступности и экономической целесообразности. Рассмотрены современные организационные модели управления проектами, ориентированные на бережливое строительство: интегрированное управление проектами (IPD), контактирование по заказам (JOC), гибридные модели, интегрирующие приведенные модели; определены перспективы их развития.

Выводы. Внедрение технологий бережливого строительства и соответствующего инструментария в России на данный момент не стало массовой практикой, несмотря на значительный научно-практический интерес к данной теме среди крупных строительных организаций, дивизионов и инфраструктурных компаний. Полученные результаты исследования позволяют сформировать комплексный подход к управлению потерями и созданию ценности в рамках проектного подхода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бережливое производство, бережливое строительство, цифровизация, цифровая трансформация, точно вовремя, поток создания ценности, интегрированное управление проектами, контактирование по заказам

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мещерякова Т.С., Кутузов В.В. Анализ технологий бережливого строительства в условиях цифровой трансформации отрасли // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 9. С. 1419–1430. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1419-1430

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Сергеевна Мещерякова, meshcheryakovats@mgsu.ru.

Analysis of lean construction technologies in the context of digital transformation of the industry

Tatiana S. Meshcheryakova¹, Victor V. Kutuzov²

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

² Belarusian-Russian University; Mogilev, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. Construction companies around the world are striving to implement tools for the comprehensive optimization of their business processes, while adopting the principles of “lean production”, the development of which is reflected in “lean construction” technologies. Within the framework of such tools, issues of both organizational and technological nature are considered, aimed at reducing or localizing losses, improving coordination between subjects of the construction process, achieved in a digital environment.

Materials and methods. The paper analyzes scientific papers on the topic of lean construction by Russian and foreign scientists reflected in the bibliographic catalog of scientific publications reflected in OpenAlex and ResearchGate, uses

data from a historical case of the construction of the fourth power unit of the Kalinin NPP, and analyzes individual public documents of the authorities of the Russian Federation and the Republic of Belarus. In the course of completing the tasks, the following scientific research methods were used: historical analysis; synthesis; generalization and formalization, which made it possible to form a set of tools and determine approaches to the implementation of lean construction technologies.

Results. Resolving contradictions and optimizing processes in the subject area of the study is built taking into account the available lean construction technologies, which should be integrated into the current activities of the organization, subject to their availability and economic feasibility. "Integrated Project Management" (IPD), "Job Order Contracting" (JOC), hybrid models integrating the above models; and the prospects for their development are defined.

Conclusions. The implementation of lean construction technologies and related tools in Russia has not yet become a mass practice, despite significant scientific and practical interest in this topic among large construction organizations, divisions and infrastructure companies. The obtained research results allow us to formulate a comprehensive approach to managing losses and creating value within the framework of the project approach.

KEYWORDS: lean manufacturing, lean construction, digitalization, digital transformation, just-in-time, value stream, integrated project management, order contacting

FOR CITATION: Meshcheryakova T.S., Kutuzov V.V. Analysis of lean construction technologies in the context of digital transformation of the industry. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(9):1419-1430. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1419-1430 (rus.).

Corresponding author: Tatiana S. Meshcheryakova, meshcheryakovats@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Концепция бережливого производства в настоящее время характеризуется новым этапом развития, который выражен в создании прикладных отраслевых инструментов для сложных производственных и организационных цепочек создания ценности. Так, в строительной отрасли получает развитие «бережливое строительство», которое определено в Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года¹. Бережливое строительство или бережливое производство в строительстве ориентировано на оптимизацию производственных процессов и непрерывное их совершенствование [1, 2]. Хотя бережливое строительство, по сути, основано на классической теории бережливого производства, его применение потребовало значительной адаптации базовых инструментов к конкретной отрасли [3].

Объект исследования — строительные организации, ориентированные на принципы бережливого строительства.

Цель исследования — выявление технологий бережливого строительства, учитывающих современные тенденции цифровой трансформации отрасли.

Для достижения поставленной цели последовательно решены следующие задачи:

- представлена характеристика инструментов бережливого строительства и их сопоставление со стандартными технологиями бережливого производства;
- выявлены потери бизнес-диагностики строительной организации в условиях оптимизации про-

изводственных процессов, внедрения, поддержки и развития инструментов бережливого строительства;

- разработана карта выбора цифровых инструментов бережливого строительства;
- охарактеризованы организационные модели управления строительными проектами по принципам бережливого строительства.

Согласно научным воззрениям, бережливое производство было внедрено в строительной отрасли для улучшения рабочих процессов, обеспечения таких продуктов отрасли, которые удовлетворяют требованиям заказчиков и современным условиям развития экономики с учетом возможной минимизации отходов хозяйственной деятельности [1–4]. При этом в основе бережливого производства в строительстве лежит классическая теория бережливого производства концерна Тойота, применение которой в строительстве потребовало значительных адаптаций в виду уникальности объектов строительства, что привело к разработке специальных инструментов [1, 3].

Основные вехи развития бережливого производства в строительстве можно разделить на последовательные этапы перехода теории и философии бережливого строительства к активному практическому развитию и систематизации принципов и технологий, включая цифровые, которые ориентированы на снижение потерь (рис. 1). Впервые в научно-практической литературе термин «бережливое строительство» используется в техническом отчете международного профессионального сообщества исследователей и представителей строительной отрасли «Центр комплексного проектирования объектов» (CIFE) Л. Коскела в 1992 г. [5]. Основоположник концепции утверждал, что несоответствие реальной модели концептуальному прототипу свидетельствует о низком уровне надежности строительного проекта. Максимальное приближение к идеальной производственной системе, воплощен-

¹ О Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года : Распоряжение Правительства РФ от 31.10.2022 № 3268-р (в ред. от 21.10.2024). URL: <https://docs.cntd.ru/document/352185341>

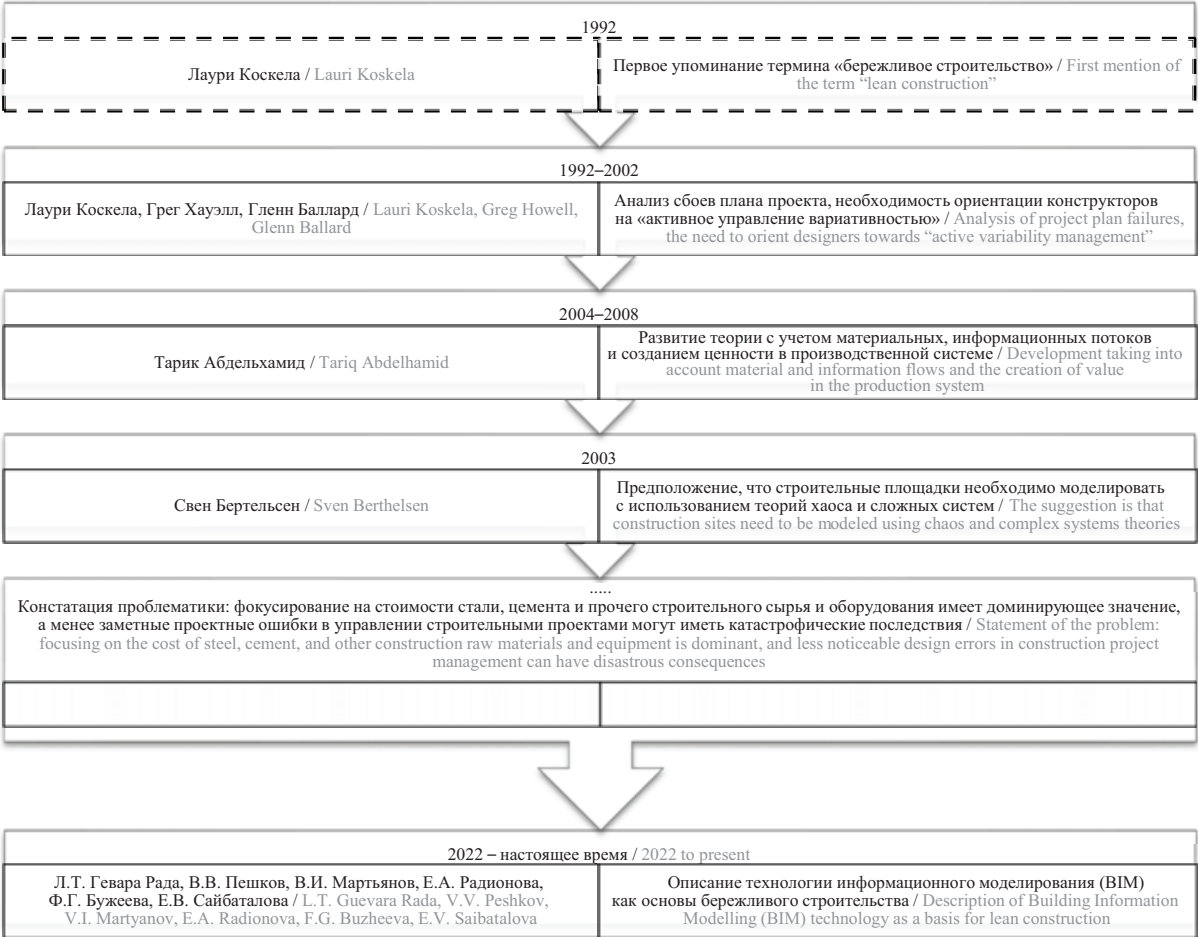


Рис. 1. Этапы развития теории «бережливое строительство» (составлено авторами на основе обобщения и систематизации научных и учебных публикаций)

Fig. 1. Stages of development of the theory of “lean construction” (compiled by the authors based on the generalization and systematization of scientific and educational publications)

ной в теории бережливого производства, позволяет разработать всеобъемлющую парадигму управления строительными процессами через следующую триаду: «преобразование» — преобразование входных данных в выходные; «вытягивание» — организация совместного планирования работ с ответственными за них подрядчиками, ориентированное на выполнение операций по запросу (потребности) последующей стадии; «создание ценности» — организация процессов в строительном проекте, которые ориентированы на максимизацию ценности объекта строительства для заказчика с учетом снижения перерасходов строительных материалов, энергетических, человеческих и временных ресурсов [5].

Л. Коскела и Г. Хауэлл в 2002 г. представили обзор проектных парадигм планирования, реализации и контроля в производственных системах. Исследуя строительные площадки и их окружение как сложные и хаотичные системы ресурсных потоков, С. Бертельсен в 2003 г. предлагает их моделировать на основе теории хаоса и сложных систем. Также ученый рассматривает строительную площадку в следующих плоскостях: как основанный на про-

екте производственный процесс; как отрасль, включающую самостоятельных агентов — независимых юридических лиц, участвующих в реализации проектов; как социальную систему, определяемую через участников строительного процесса, их трудовые и экономические взаимоотношения.

С. Баллард и Г. Хауэлл на основе анализа реальных практик отмечают, что «около 50 % задач, указанных в еженедельных планах работ, выполняются к концу недели», а устранить проблемы возможно при фокусировке на процессах управления неопределенностью, включая структурирование проекта (в современном понимании это предложение отражается в структурной декомпозиции работ — WBS). Т. Абдельхамид констатирует, что стандартный инструментарий (метод критического пути, управление освоенным объемом работ и прочее) не обеспечивает в необходимой мере высокую вероятность достижения результатов в запланированные сроки [6].

Современные условия и отраслевая специфика определили потребность в разработке специальных технологий бережливого строительства [7–16]. Теория бережливого строительства получает активное

развитие не только с учетом анализа и постоянного совершенствования подходов к управлению материалами, оборудованием и другими видами ресурсов, но в условиях организационной оптимизации производственных процессов по современным моделям проектного управления.

Также в рамках адаптации исследуемой теории и практических технологий выделяется специальный подход, определяемый как «бережливый дизайн» (бережливое проектирование), направленный на устранение потерь и действий, не добавляющих ценности, в процессах проектирования (например, неоправданная детализация спецификаций или временные затраты на выявление информации, не требующейся для следующего этапа работ) [7].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрены базовые инструменты бережливого строительства, предлагаемые в научных изданиях, использованы публичные данные применения технологий бережливости в крупных строительных проектах.

Первым крупным проектом, где нашли комплексное применение технологии бережливого строительства, является четвертый энергоблок Калининской АЭС (КАЭС), реализуемый в 2007–2011 гг. (рис. 2). Отдельные характеристики и аспекты реализации проекта опубликованы в докладах конференции «Атомэкспо», содержатся в научных статьях, диссертациях, монографических и профессиональных изданиях [17–19].

Снижение потерь (муда/muda) данного проекта достигнуто за счет: оптимизации логистики по технологии JIT (Just-in-Time — точно в срок); применения технологий информационного моделирования (ТИМ) на этапе проектирования; «вытягивающего планирования», опирающегося на планирование с конца, где учитывались интересы стейкхолдеров, включая подрядчиков; визуализации процессов через дашборды и KPI; стандартизации процессов через унификацию и тиражирование типовых решений.

Исходными данными, подтверждающими масштабы применения технологий бережливого произ-

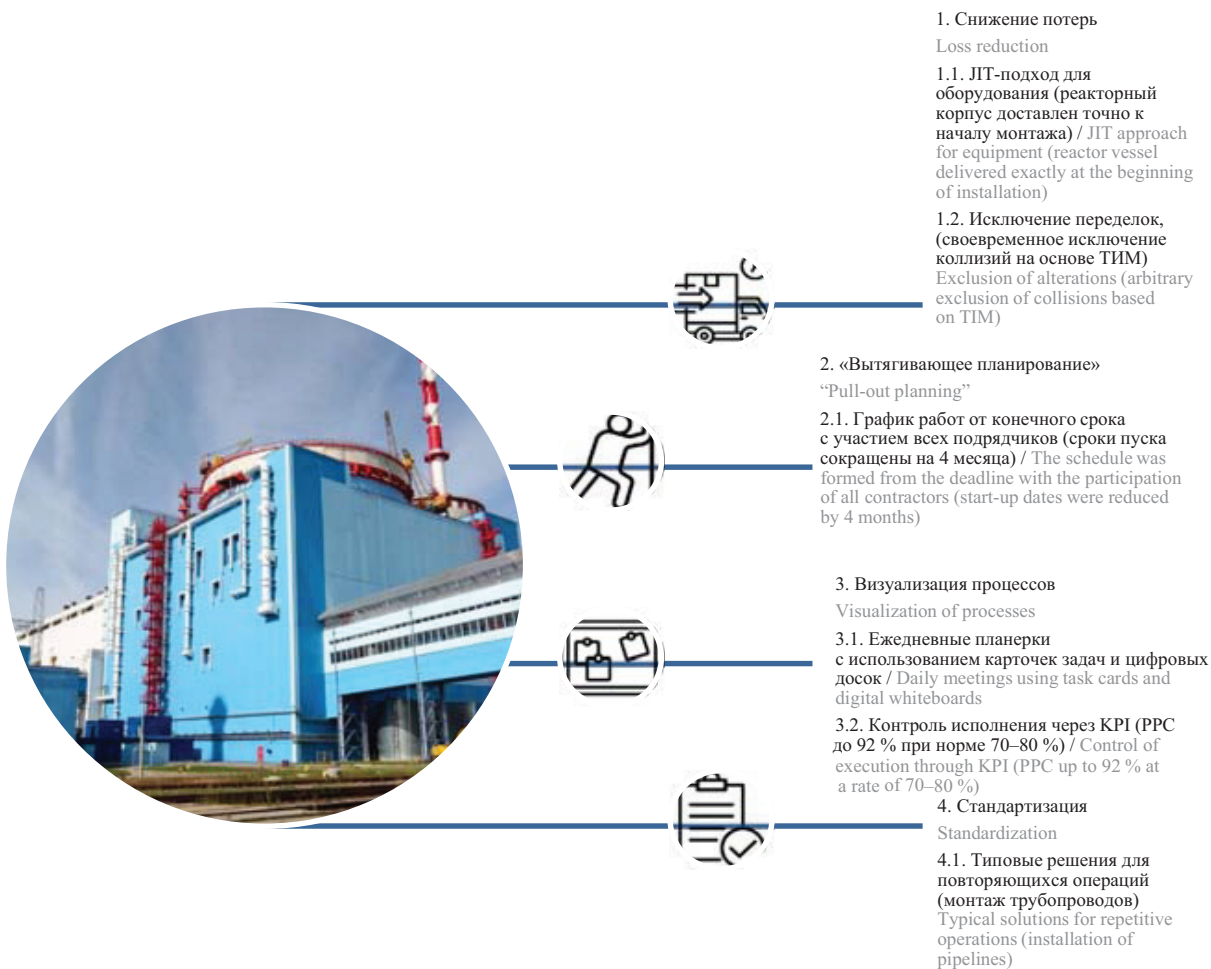


Рис. 2. Особенности бережливого строительства на объекте четвертого энергоблока КАЭС (Росатом) (составлено авторами на основе обобщения и систематизации публичных источников)

Fig. 2. Features of lean construction at the facility of the fourth power unit of the Nuclear Power Plant (Rosatom) (compiled by the authors based on the generalization and systematization of public data)

водства, служат отчетные документы Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь, которые демонстрируют развернутую стандартизированную базу инструментов бережливого строительства и этапы бизнес-диагностики строительных организаций, не учитывающие национальные особенности и имеющие полную совместимость с подходами российских субъектов строительного рынка². Эти сведения имеют особую значимость с учетом перспектив реализации совместных российско-белорусских проектов, включая строительство АЭС в Беларуси на площадке Могилевской области.

Использован метод эмпирического уровня — сравнение. Этот метод применяется для сопоставления технологий бережливого производства

² Особенности методологии применения элементов «бережливого производства» применительно к строительной отрасли: бизнес-диагностика организации и ключевые инструменты внедрения отдельных элементов концепции «бережливого производства» в организациях Минстройархитектуры. Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. URL: <https://budexport.by/wp-content/uploads/2025/02/Бережливое-производство-в-строительной-отрасли.pdf>

и бережливого строительства с учетом современных возможностей строительной отрасли, а также при сравнении моделей IPD и JOC, что обеспечивает сопоставление их характеристик и определение прикладных направлений развития. К методам экспериментально-теоретического уровня, используемым в работе и выявляющим основу научной проблематики, относятся: исторический анализ в аспекте генезиса развития теории бережливого строительства; синтез определяющей закономерности по предметной теме исследования. Методами теоретического уровня, обеспечивающими логику исследования, являются обобщение и формализация, позволившие сформировать систематизированные инструменты, модели, подход к реализации технологии бережливого строительства на основе шаблона карты инструментов бережливого строительства.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Всеобъемлющим постулатом в практике управления строительными проектами считается, что в случае, если технология, инструмент, метод или техника позволяют обеспечить принципы бережливого строительства, то они могут входить в состав технологии бережливого строительства [7–12]. В рамках обзора на-

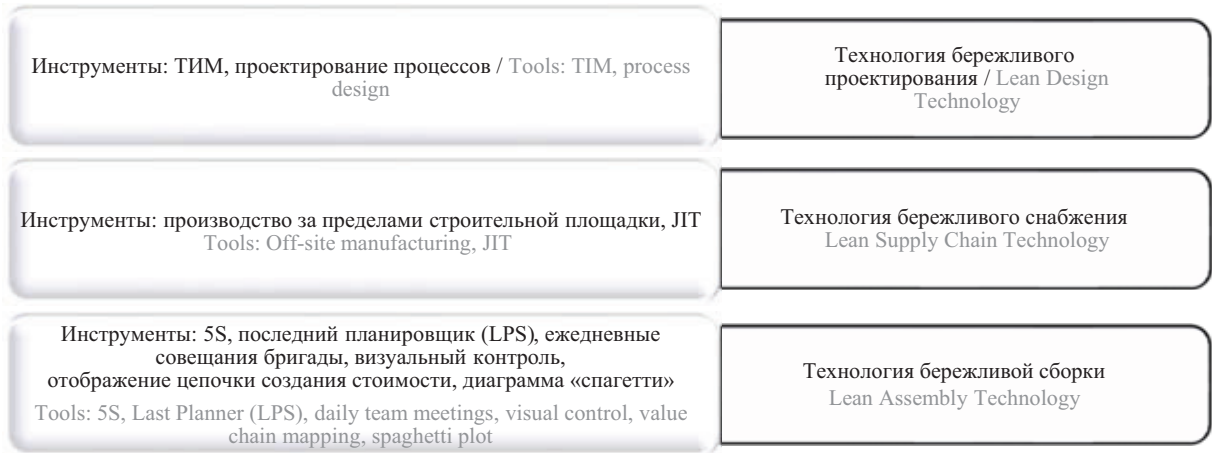


Рис. 3. Инструменты бережливого строительства (составлено авторами)

Fig. 3. Lean Construction Tools (compiled by the authors)

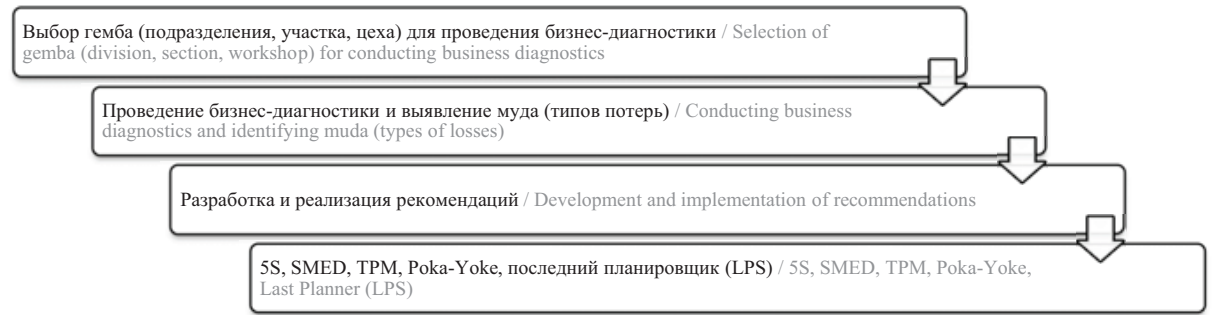


Рис. 4. Этапы бизнес-диагностики (составлено по данным ОАО «НИИ Стroyэкономика»)²

Fig. 4. Stages of business diagnostics (compiled based on data from JSC “Research Institute of Stroyeconomy”)²

Шаблон карты инструментов бережливого строительства (составлено авторами)
Lean Construction Tool Map Template (compiled by the authors)

	Гемба по основным процессам / Gemba by main processes	Инструменты Tools	Технологии, доступное ПО (вендер-лист) Technologies, available software (vendor list)	Капитальные + текущие затраты, руб. Capex + opex, rub
Предпроектная подготовка / Pre-project preparation				
Доступные инструменты: 5S, SMED, TPM, Poka-Yoke, LPS / Available tools: 5S, SMED, TPM, Poka-Yoke, LPS				
Анализ рынка / Market analysis	–	–	–	–
Выбор земельного участка / Choosing a land plot	–	–	–	–
Получение разрешительной документации Obtaining permits	–	–	–	–
Разработка концепции проекта / Development of the project concept	XXX	Poka-Yoke	Шаблон брифа, чек-лист сверки данных (геология, этажность) / Brief template, data verification checklist (geology, number of floors)	XXX
Проектирование / Designing				
Инструменты: Poka-Yoke, LPS / Available tools: Poka-Yoke, LPS				
Разработка проектной документации Development of project documentation	XXX	Poka-Yoke	ПО для автоматизации проверки нормативов (ТИМ, скрипты для сверки с ГОСТ) / Software for automating the verification of standards (TIM, scripts for verification with GOST)	XXX
Прохождение экспертиз / Passing examinations	–	–	–	–
Согласование с заказчиком и корректировки Coordination with the customer and adjustments	–	–	–	–
Подготовка к строительству / Preparation for construction				
Доступные инструменты: 5S, SMED, TPM, Poka-Yoke, LPS / Available tools: 5S, SMED, TPM, Poka-Yoke, LPS				
Выбор подрядчиков и поставщиков Coordination with the customer and adjustmentsselection of contractors and suppliers	–	–	–	–
Организация стройплощадки / Organization of the construction site	XXX	5S	Маркировка зон хранения материалов Marking of material storage areas	XXX
Получение разрешения на строительные работы Obtaining a construction permit	–	–	–	–

Окончание табл. / End of the Table

	Гемба по основным процессам / Gemba by main processes	Инструменты Tools	Технологии, доступное ПО (вендер-лист) Technologies, available software (vendor list)	Капитальные + текущие затраты, руб. Capex + opex, rub
Строительно-монтажные работы / Construction and installation works Доступные инструменты: 5S, SMED, TPM, Poka-Yoke, LPS / Available tools: 5S, SMED, TPM, Poka-Yoke, LPS				
...	XXX	5S	Визуальная и картографическая организация порядка на стройплощадке. Системы видеонаблюдения / Visual and cartographic organization of order on the construction site. Video surveillance systems	XXX
		SMED	Перенастройка кранов, опалубочных систем; стандартизация процедур переключения между задачами Reconfiguration of cranes, formwork systems; standardization of procedures for switching between tasks	
		TPM	Эксплуатация техники и регулярная диагностика/профилактика поломок Operation of equipment and regular diagnostics/prevention of breakdowns	
		Poka-Yoke	Контроль качества работ и технической оснащенности, в том числе сегей / Quality control of work and technical equipment, including networks	
		LPS	Регулярные встречи с бригадами (минимальный разрыв в неделю), учет фактических данных в плане производства работ / Regular meetings with teams (minimum gap per week), consideration of actual data in the work plan	
Завершение работ, сдача объекта / Completion of works, delivery of the facility Доступные инструменты: 5S, LPS / Available tools: 5S, LPS				
...	XXX	...	...	XXX

учных работ и лучших практик определены базовые инструменты бережливого строительства (рис. 3).

Выбор и применение инструментов бережливого строительства в деятельности строительной организации или в рамках отдельного проекта должны происходить с учетом выявленных или вероятных системных потерь (муда/мури/мура) и определения мест потерь (гемба). Научно-исследовательский центр по экономике и праву в строительстве Республики Беларусь ОАО «НИИ Стройэкономика» предлагает единый подход к развертыванию инструментов и следующие стандартные этапы предиктивной бизнес-диагностики (рис. 4).

Таким образом, проводится систематизация и управление потерями по выбранным объектам бизнес-диагностики — структурным подразделениям, отдельным участкам или цехам. Последовательная реализация каждого из этапов позволяет осуществить выбор инструментов бережливого строительства, способных минимизировать или устранить потери. При этом в рекомендациях не учитываются возможности организации для эффективного развертывания необходимых инструментов.

Для разрешения данного противоречия и определения оптимального состава портфеля инструментов бережливого строительства предлагается формировать декомпозицию мест потерь по этапам реализации проекта (табл.).

В случае отсутствия функциональной бизнес-модели проекта следует составить краткое описание ключевых бизнес-процессов проекта по этапам его реализации, а также распределить инструменты бережливого строительства. Портфель технологий и программного обеспечения, предварительно приоритизированный по матрице Эйзенхауэра (срочно-важно), необходимо калькулировать и включить в финансовую модель проекта. При сквозном внедрении технологий бережливого строительства в деятельность организации подобная матрица может быть составлена аналогичным образом по функциональным блокам.

Для приведенных случаев (внедрение бережливого строительства в отдельный проект или в деятельность организации в целом) также назначаются ответственные за ошибки по модели WBS и строится матрица распределения ответственности.

Модель IPD (цель — оптимизация сложных проектов) / IPD model (the goal is to optimize complex projects)

Состав участников: архитекторы, подрядчики, заказчик / Participants: architects, contractors, customer

Сроки: средние/долгосрочные (более 1 года) / Terms: medium/long-term (more than 1 year)

Технологии: ТИМ, цифровые двойники / Technologies: TIM, digital doppelgangers

Объекты: больницы, аэропорты, пилотные проекты в госкорпорациях (Росатом, РЖД) / Facilities: hospitals, airports, pilot projects in state corporations (Rosatom, Russian Railways)

Особенности / Features:

- раннее вовлечение всех сторон (на стадии проектирования) / early involvement of all parties (at the design stage);
- общие риски и вознаграждения (финансовая прозрачность) / general risks and rewards (financial transparency);
- фокус на ценности для заказчика, а не на минимизации затрат / focus on customer value rather than cost minimization

Модель JOC (цель — стандартизация мелких заказов) / The JOC model (the goal is to standardize small orders)

Состав участников: заказчик, подрядчик / Participants: customer, contractor

Сроки: краткосрочные (недели – месяцы) / Terms: short-term (weeks – months)

Технологии: базы данных расценок / Technologies: pricing databases

Объекты: ремонты социальных объектов, укладка дорог / Objects: repairs of social facilities, laying of roads

Особенности / Features:

- каталог заранее согласованных работ и цен: ФЕР/ГЭСН, ТСН-2001 для Москвы и региональные расценки, коммерческие базы «Гранд-Смета», «РИК» / Catalog of pre-agreed works and prices: FER/GESN, TSN-2001 for Moscow and regional prices, commercial bases “Grand-Estimate”, “RICK”;
- упрощенный процесс заказа, ориентация на скорость (без тендеров, в короткие сроки) / Simplified ordering process, focusing on speed (without tenders, in a short time);
- ориентирован на повторяющиеся задачи (ремонт, модернизация) / It is focused on repetitive tasks (repairs, upgrades)

Гибридные модели / Hybrid models

IPD для проектирования + JOC для эксплуатации / IPD for design + JOC for operation

Объекты: госзаказы, инфраструктурные объекты / Facilities: government orders, infrastructure facilities

Рис. 5. Организационные модели управления строительными проектами по принципам бережливого строительства (составлено авторами на основе обобщения и систематизации публичных источников) [3, 15]

Fig. 5. Organizational models for managing construction projects based on lean construction principles (compiled by the authors based on the generalization and systematization of scientific and educational publications) [3, 15]

Результатом применения инструментов бережливого строительства является минимизация простоев, т.е. непрерывность работы сотрудников, сокращение запасов и снижение различных видов потерь.

Помимо технологий и соответствующего технического инструментария, в настоящее время получают развитие организационные модели управления проектами, ориентированные на бережливое строительство: интегрированное управление проектами (IPD) и контактирование по заказам (JOC), объединяющие элементы планирования, закупки и другие функциональные направления при реализации строительных проектов (рис. 5).

В модели IPD опираются на раннее привлечение подрядчиков и поставщиков для учета стейкхолдерского подхода при принятии решений, что соответствует трендам развития современного бережливого строительства [3, 15]. В модели JOC ключевой особенностью и целью ее применения является стандартизация работ [15]. Помимо приведенных моделей перспективным направлением развития проектного управления служит применение гибридных моделей, совмещающих IPD и JOC. Такие модели могут быть в последовательной, параллельной или многоуровневой интеграции. В качестве одного из перспективных направлений реализации гибридной модели могут стать проекты строительства высокотехнологичных центров, университетские городки или кампусы мирового уровня на базе федеральных университетов, где проектную часть целесообразно реализовывать по IPD-модели с привлечением ученых, а эксплуатационную часть проекта — по JOC-модели, обеспечивающей стандартизацию работ и прогнозируемость финансовой модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Бережливое производство получило новый этап развития в самых различных отраслях, включая строительство, где развивается отдельная философия бережливого строительства, которая расширяется по прикладным инструментам, приведенным в исследовании: 5S, SMED, TPM, Poka-Yoke, LPS [6–20]. Рассмотренные инструменты могут успешно применяться с учетом доступного программного обеспечения. Для организации рабочего пространства (5S) предлагаются: 1С:Документооборот, кайдзен-платформа. С целью быстрой переналадки (SMED) целесообразно использовать: для учета и анализа простоев 1С:ERP, для моделирования процессов переналадки оборудования «ТехноКад» или проводить видеохронометраж с ручным анализом. Программы, обеспечивающие всеобщий уход за оборудованием (TPM), рассматриваются в зависимости от условий объекта анализа и типа бригад. Так, например, для стационарных бригад используют «1С:Управление производственным предприятием», а при наличии датчиков — «КИП Сервис». Инструментами защиты

от ошибок (Poka-Yoke) в первую очередь являются: ТИМ (Renga, nanoCAD), система управления инженерными данными «ЛОЦМАН:PLM», система диспетчерского контроля данными (SCADA-системы). Последний планировщик (LPS) реализуется через программы: «1С:Управление строительной компанией» при учете ресурсов в календарном планировании; «Битрикс24» при составлении задач и чек-листов и т.п. Выбор инструментов бережливого строительства следует осуществлять в самом начале реализации проекта, предварительно рассматривая возможные места потерь (гемба), учитывая опыт организации и вероятные виды потерь (муда), для чего составлен шаблон карты инструментов бережливого строительства.

Преобладающее число объектов строительства имеют уникальные признаки и не соответствуют базовому подходу к процессу как к конвейерному производству. В виду чего имеются отличия бережливого строительства от бережливого производства. Основное направление развития инструментов в бережливом строительстве в первую очередь связано с координацией участников и стейкхолдеров строительного проекта, в отличие от традиционного бережливого производства, ориентированного исключительно на выявление потерь в цепочке создания ценности.

В рамках анализа научных публикаций и отчетных документов публичных российских организаций, а также сведений научно-исследовательского центра по экономике и праву в строительстве Республики Беларусь ОАО «НИИ Стройэкономика» выявлены универсальные этапы бизнес-диагностики строительных организаций, необходимые для отбора инструментов бережливого строительства. В приведенных этапах отсутствуют требуемые для любой коммерческой организации технические и экономические ограничения, в связи с чем предлагается к разработке уникальная для каждой организации и отдельного проекта карта инструментов бережливого строительства, которая предполагает верификацию по текущим основным, поддерживающим и вспомогательным бизнес-процессам. При условии значительной цифровой трансформации всей строительной организации подобная схема является информационной основой для разработки функциональной бизнес-модели.

Относительно модели организации управления строительным проектом в контексте бережливого строительства рассмотрены IPD-модели с ориентацией на стейкхолдеров, JOC-модели с ориентацией на стандартизацию процессов и гибридные модели с различными вариантами интеграции IPD и JOC-моделей.

Перспективное направление исследования — верификация технологий и доступного ПО, соответствующего принципам бережливого производства и бережливого строительства для различных участников отрасли и строительного процесса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Freire J., Alarcón L.F. Achieving Lean Design Process: Improvement Methodology // Journal of Construction Engineering and Management. 2002. Vol. 128. Issue 3. Pp. 248–256. DOI: 10.1061/(asce)0733-9364-(2002)128:3(248)
2. O'Brien W.J., Fischer M.A., Akinici B.H. Importance of Site Conditions and Capacity Allocation for Construction Cost and Performance: A Case Study // Proceedings of the 5th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. 1997.
3. Bertelsen S. Lean Construction: Where Are We and How to Proceed? // Lean Construction Journal. 2004. Pp. 46–69. DOI: 10.60164/55h8g4h8c
4. Mossman A. What Is Lean Construction: Another Look – 2018 // Annual Conference of the International Group for Lean Construction. 2018. DOI: 10.24928/2018/0309
5. Koskela L.J. Application of the New Production Philosophy to Construction. 1992.
6. Mitera-Kielbasa E., Zima K. Optimising Construction Efficiency: A Comprehensive Survey-Based Approach to Waste Identification and Recommendations with BIM and Lean Construction // Sustainability. 2025. Vol. 17. Issue 9. P. 4027. DOI: 10.3390/su17094027
7. Luna A., Herrera R.F., Castañeda K., Atencio E., Biotto C. Benefits and Limitations of Lean Tools in the Building Design Process: A Functional and Comparative Analysis // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. Issue 9. P. 5137. DOI: 10.3390/app15095137
8. Zhang T. Research on Optimization of Construction Management Process of Construction Project // Highlights in Science, Engineering and Technology. 2025. Vol. 137. Pp. 51–57. DOI: 10.54097/tqrnw06
9. Karaz M., Teixeira J.M.C., Amaral T.G. Mitigating Making-Do Practices Using the Last Planner System and BIM: A System Dynamic Analysis // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 8. P. 2314. DOI: 10.3390/buildings14082314
10. Likita A.J., Jelodar M.B., Vishnupriya V., Rotimi J.O.B. A guideline for BIM and lean integrated construction practice // Smart and Sustainable Built Environment. 2025. Vol. 14. Issue 4. Pp. 1264–1291. DOI: 10.1108/SASBE-03-2024-0098
11. Simukonda W., Emuze F. A Perception Survey of Lean Management Practices for Safer Off-Site Construction // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 9. P. 2860. DOI: 10.3390/buildings14092860
12. Li Z., Mok Paik S. Resource cost optimization strategies in off-site manufacturing for modern construction methods: a lean theory perspective case study in Ireland // International Journal of Construction Management. 2025. Pp. 1–9. DOI: 10.1080/15623599.2025.2490169
13. Luo L., Ding Z., Niu J., Zhang L., Liao L. A Digital Project Management Framework for Transnational Prefabricated Housing Projects // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 9. P. 2915. DOI: 10.3390/buildings14092915
14. Sihombing L. Integrated Project Delivery berdasarkan Building Information Modeling (BIM) // Program Profesi Arsitek melalui kegiatan Kuliah Bersama matakuliah Integrated Project Delivery. 2025.
15. Patrucco A.S., Dimand A.M. Job Order Contracting (JOC) as an Alternative Project Delivery Method: Challenges and Opportunities. 2021. DOI: 10.13140/RG.2.2.32755.66084
16. Соловьева Е.В., Даниелова А.Г. Адаптация строительных организаций России для эффективного внедрения и применения инновационных методов бережливого строительства // Вестник евразийской науки. 2020. Т. 12. № 6. С. 31. EDN YNEHJN.
17. Шведов В.В. Использование концепции «бережливое строительство» в управлении строительными компаниями // Заметки ученого. 2021. № 3–1. С. 464–471. EDN QJNOZR.
18. Сайфуллина Ф.М., Вирцев М.Ю., Мамедова Л.Б.К., Салахов Р.Л. Бережливое строительство как инструмент стимулирования инновационной активности // Региональные проблемы преобразования экономики. 2023. № 3 (149). С. 126–133. DOI: 10.26726/1812-7096-2023-3-126-133. EDN WMPINZ.
19. Warid O., Hamani K. Lean Construction in the UAE: Implementation of Last Planner System® // Lean Construction Journal. 2023. Pp. 1–20. DOI: 10.60164/96f4a5e0g
20. Ghanem M., Hamzeh F., Seppänen O., Shehab L., Zankoul E. Pull planning versus push planning: Investigating impacts on crew performance from a location-based perspective // Frontiers in Built Environment. 2022. Vol. 8. DOI: 10.3389/fbuil.2022.980023

Поступила в редакцию 16 мая 2025 г.

Принята в доработанном виде 14 июля 2025 г.

Одобрена для публикации 14 июля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Татьяна Сергеевна Мещерякова — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и инноваций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; MeshcheryakovaTS@mgstu.ru;

Виктор Владимирович Кутузов — заведующий кафедрой программного обеспечения информационных технологий; **Белорусско-Российский университет**; Республика Беларусь, 212000, г. Могилев, пр-т Мира, д. 43; kutuzov.bru@yandex.ru.

Вклад авторов:

Мещерякова Т.С. — концепция исследования, сбор и обработка материала, написание исходного текста.

Кутузов В.В. — научное редактирование текста, сбор материала, доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Freire J., Alarcón L.F. Achieving Lean Design Process: Improvement Methodology. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2002; 128(3):248-256. DOI: 10.1061/(asce)0733-9364(2002)128:3(248)
2. O'Brien W.J., Fischer M.A., Akinci B.H. Importance of Site Conditions and Capacity Allocation for Construction Cost and Performance: A Case Study. *Proceedings of the 5th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. 1997.
3. Bertelsen S. Lean Construction: Where Are We and How to Proceed? *Lean Construction Journal*. 2004; 46-69. DOI: 10.60164/55h8g4h8c
4. Mossman A. What Is Lean Construction: Another Look – 2018. *Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. 2018. DOI: 10.24928/2018/0309
5. Koskela L.J. *Application of the New Production Philosophy to Construction*. 1992.
6. Mitera-Kielbasa E., Zima K. Optimising Construction Efficiency: A Comprehensive Survey-Based Approach to Waste Identification and Recommendations with BIM and Lean Construction. *Sustainability*. 2025; 17(9):4027. DOI: 10.3390/su17094027
7. Luna A., Herrera R.F., Castañeda K., Atencio E., Biotto C. Benefits and Limitations of Lean Tools in the Building Design Process: A Functional and Comparative Analysis. *Applied Sciences*. 2025; 15(9):5137. DOI: 10.3390/app15095137
8. Zhang T. Research on Optimization of Construction Management Process of Construction Project. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2025; 137:51-57. DOI: 10.54097/tqmww06
9. Karaz M., Teixeira J.M.C., Amaral T.G. Mitigating Making-Do Practices Using the Last Planner System and BIM: A System Dynamic Analysis. *Buildings*. 2024; 14(8):2314. DOI: 10.3390/buildings14082314
10. Likita A.J., Jelodar M.B., Vishnupriya V., Rotimi J.O.B. A guideline for BIM and lean integrated construction practice. *Smart and Sustainable Built Environment*. 2025; 14(4):1264-1291. DOI: 10.1108/SASBE-03-2024-0098
11. Simukonda W., Emuze F. A Perception Survey of Lean Management Practices for Safer Off-Site Construction. *Buildings*. 2024; 14(9):2860. DOI: 10.3390/buildings14092860
12. Li Z., Mok Paik S. Resource cost optimization strategies in off-site manufacturing for modern construction methods: a lean theory perspective case study in Ireland. *International Journal of Construction Management*. 2025; 1-9. DOI: 10.1080/15623599.2025.2490169
13. Luo L., Ding Z., Niu J., Zhang L., Liao L. A Digital Project Management Framework for Transnational Prefabricated Housing Projects. *Buildings*. 2024; 14(9):2915. DOI: 10.3390/buildings14092915
14. Sihombing L. Integrated Project Delivery berdasarkan Building Information Modeling (BIM). *Program Profesi Arsitek melalui kegiatan Kuliah Bersama matakuliah Integrated Project Delivery*. 2025.
15. Patrucco A.S., Dimand A.M. *Job Order Contracting (JOC) as an Alternative Project Delivery Method: Challenges and Opportunities*. 2021. DOI: 10.13140/RG.2.2.32755.66084
16. Solovieva E.V., Danyelova A.G. Adaptation of construction organizations in Russia for the effective implementation and application of innovative methods of lean construction. *The Eurasian Scientific Journal*. 2020; 12(6):31. EDN YNEHJN. (rus.).
17. Shvedov V.V. Using the concept of “lean construction” in the management of construction companies. *Notes of a Scientist*. 2021; 3-1:464-471. EDN QJNOZR. (rus.).
18. Sayfullina F.M., Virtsev M.Yu., Mammadova L.B.K., Salakhov R.L. Lean construction as a tool to stimulate innovation activity. *Regional Problems of Economic Transformation*. 2023; 3(149):126-133. DOI: 10.26726/1812-7096-2023-3-126-133. EDN WMPINZ. (rus.).
19. Warid O., Hamani K. Lean Construction in the UAE: Implementation of Last Planner System®. *Lean Construction Journal*. 2023; 1-20. DOI: 10.60164/96f4a5e0g
20. Ghanem M., Hamzeh F., Seppänen O., Shehab L., Zankoul E. Pull planning versus push planning: Investigating impacts on crew performance from a location-based perspective. *Frontiers in Built Environment*. 2022; 8. DOI: 10.3389/fbuil.2022.980023

Received May 16, 2025.

Adopted in revised form on July 14, 2025.

Approved for publication on July 14, 2025.

B I O N O T E S: **Tatiana S. Meshcheryakova** — Candidate of Economics, 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; MeshcheryakovaTS@mgsu.ru;

Victor V. Kutuzov — Head of the Department of Software for Information Technologies; **Belarusian-Russian University**; 43 Mira ave., Mogilev, 212000, Republic of Belarus; kutuzov.bru@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Tatiana S. Meshcheryakova — research concept, collection of material, processing of material, writing of the original text.

Victor V. Kutuzov — scientific editing of the text, collection of material, revision of the text.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.003

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1431-1442

Эффективность применения BIM-технологий при демонтаже зданий

Елена Юрьевна Васильева¹, Яну Ариани²¹ *Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;*² *Университет Индонезии; г. Депока, Индонезия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Изучен вопрос целесообразности и эффективности применения технологий информационного моделирования (BIM-технологий) при реализации инвестиционно-строительных проектов. Внимание было сосредоточено на стадии демонтажа зданий и сооружений, а также на управлении образующимися при этом отходами.

Материалы и методы. Проанализированы работы отечественных и зарубежных авторов; официальные сайты строительных организаций; данные, описывающие опыт демонтажа зданий, содержащиеся в печатных изданиях, научных публикациях, практических исследованиях, интернете, материалах научно-практических конференций, семинаров и форумов, публикациях Росстата. Использованы системный и процессный подходы, такие методы научного исследования, как наблюдение, описание, количественно-статистический анализ, сравнительно-сопоставительный анализ.

Результаты. Исследованы инновационные технологии, которые могут быть внедрены в деятельность по демонтажу зданий и сооружений. Рассмотрен отечественный и зарубежный опыт применения информационных технологий для демонтажа, описаны основные методы и средства, выявлены преимущества BIM-технологий.

Выводы. Внедрение BIM-технологий в деятельность организаций, осуществляющих демонтаж зданий и сооружений, позволяет получить ряд положительных эффектов: сократить сроки работ, снизить их стоимость, повысить безопасность, уменьшить воздействие негативных факторов на экологическую обстановку и комфортность проживания, усовершенствовать управление отходами. Однако существуют барьеры внедрения и эффективного применения BIM-технологий в демонтажную деятельность. Сформулированы наиболее перспективные направления дальнейших исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: технологии информационного моделирования, BIM-технологии, демонтаж зданий и сооружений, демонтажная деятельность, инновационные технологии демонтажа зданий, эффективность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Васильева Е.Ю., Ариани Я. Эффективность применения BIM-технологий при демонтаже зданий // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 9. С. 1431–1442. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1431-1442

Автор, ответственный за переписку: Елена Юрьевна Васильева, elena.chibisova_metr@mail.ru.

Efficiency of BIM-technologies application in dismantling of buildings

Elena Yu. Vasilyeva¹, Yanu Aryani²¹ *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;*² *University of Indonesia; Depok, Indonesia*

ABSTRACT

Introduction. The authors of the paper studied the matter of expediency and efficiency of the use of the technologies of information modelling or building informational modelling (BIM-technologies) during the implementation of investment-and-construction projects. The attention of the authors was concentrated on the stage of dismantling of buildings and structures as well as on management of the waste which is formed at the same time.

Materials and methods. The works by domestic and foreign authors and also the maintenance of the official sites of the construction organizations, the data describing experience of dismantling of buildings, which are contained in printing editions, scientific publications, practical research, Internet, materials of academic-and-research conferences, seminars and forums, publications of Rosstat served as the materials of the research. During preparation of the paper the authors used the system and process approaches, such methods of scientific research as observation, the description, quantitative and statistical analysis, the comparative and comparative analysis.

Results. The authors studied the innovation technologies, which can be introduced in the activities for dismantling of buildings and structures. Domestic and foreign experience of the use of information technologies for dismantling was analyzed, benefits of BIM-technologies were revealed.

Conclusions. As the result of the conducted research the authors made the conclusion, that the implementation of the BIM-technologies in organization activity performing dismantling of buildings and structures allows to gain some positive effects: to reduce terms of works, to reduce their cost, to increase security, to reduce impact of negative factors on an ecological situation and on the comfort of accommodation, to improve waste management. Nevertheless, there are several barriers of introduction and effective use of BIM technologies in the dismantling activity. Thus, the most perspective directions of further researches were formulated.

KEYWORDS: technologies of information modelling, TIM-technology, building informational modelling, BIM-technology, dismantling of buildings and constructions, dismantling activity, the innovation technologies of dismantling of buildings, efficiency

FOR CITATION: Vasilyeva E.Yu., Aryani Ya. Efficiency of BIM-technologies application in dismantling of buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(9):1431-1442. DOI: 10.22227/1997-0935. 2025.9.1431-1442 (rus.).

Corresponding author: Elena Yu. Vasilyeva, elena.chibisova_metr@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях ориентации строительных организаций на инновационное развитие активное внедрение и применение современных технологий целесообразность и эффективность BIM-технологий не вызывают сомнений.

Использованию информационных технологий (ИТ) в деятельности строительных организаций посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых, однако необходимо отметить, что их исследования не освещают в полной мере все аспекты внедрения BIM-технологий в деятельность компаний, реализующих инвестиционно-строительные проекты (ИСП). Большинство исследователей ограничивается изучением возможностей и перспектив применения BIM-технологий на стадии проектирования, что достаточно логично, учитывая,

что именно эта стадия ИСП отличается наибольшей степенью цифровизации [1]. В меньшей степени изучены вопросы использования BIM-технологий на этапе возведения зданий и их эксплуатации [2, 3]. Что касается демонтажа зданий, применение ИТ для проведения работ изучено мало, как и сама деятельность по демонтажу, которая воспринималась долгое время второстепенной по сравнению с возведением зданий, что представляется неверным.

Демонтаж зданий и сооружений является неотъемлемой и важной стадией ИСП. Обычно считается, что снос — это завершающий этап жизненного цикла (ЖЦ). Однако в крупных городах, реализующих программы реновации, снос аварийных и ветхих зданий с последующей подготовкой территории становится не завершающим, а напротив, начальным этапом ЖЦ. Таким образом, применение BIM-технологий встраивается не в цепочку с конечной

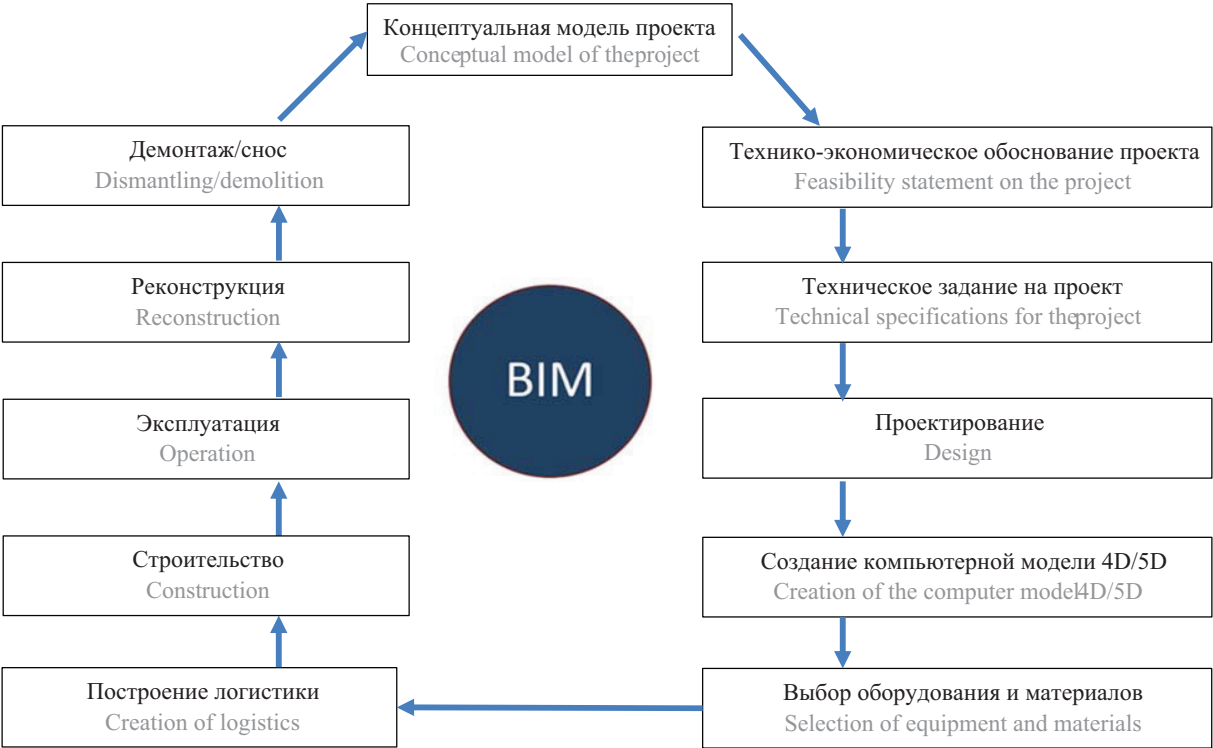


Рис. 1. Применение BIM-технологий на различных этапах жизненного цикла здания

Fig. 1. Use of BIM technologies during various stages of lifecycle of the building

точкой (сносом отслужившего здания), а в ЖЦ здания, повторяющийся на каждой территории, подлежащей застройке (рис. 1).

Демонтаж следует рассматривать и как часть городского развития. Снос зданий — неотъемлемая часть ЖЦ городской инфраструктуры. Традиционные методы демонтажа, такие как использование тяжелой техники и взрывных работ, часто сопряжены с высоким уровнем шума, вибрации, пыли и представляют значительные риски для безопасности рабочих и населения, кроме того, они не решают проблему вывоза и утилизации образующихся отходов, предполагают выброс углеводородов в атмосферу, несут прочий экологический вред, в целом ухудшают условия, снижают комфортность проживания людей на территории, где проводится демонтаж.

Сегодня процессы демонтажа и сноса зданий в РФ сталкиваются с высоким уровнем аварийности, экологическими рисками, низкой эффективностью традиционных методов в условиях плотной застройки и устаревшей нормативной базой, не учитывающей современные технологии. Механизированный снос экскаваторами часто приводит к чрезмерным затратам труда, времени, технических ресурсов, высокой стоимости работ, а также к нарушению экологических норм, возникновению таких негативных факторов, как шум, пыль, вибрации, возникновению сложностей с вывозом и захоронением отходов, обнаружением вредных отходов (например, асбеста), особенно в крупнейших городах, таких как Москва и Санкт-Петербург. Инновационные методы, заимствованные из зарубежной практики, необходимы для модернизации отрасли, повышения безопасности, сокращения экологического следа и соответствия глобальным трендам устойчивого развития, в том числе развития «зеленого строительства» [4]. Рост объемов реновации и потребность в утилизации отходов усиливают необходимость таких инноваций.

В последние годы наблюдается значительный прогресс в разработке и внедрении инновационных технологий, направленных на повышение экономичности, безопасности и экологичности всех строительных процессов. Авторами были изучены инновационные технологии, которые могут быть применены для демонтажа зданий и сооружений, их преимущества и потенциальная эффективность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проанализирована информация о новых подходах к демонтажу зданий и сооружений и применении BIM в этом сегменте деятельности, приведенная отечественными и зарубежными авторами, а также обсуждаемая на различных научно-практических конференциях и форумах (Международный демонтажный форум — Russian Demolition Forum, деловая программа выставки строительной техники и технологий СТТ Ехро и т.д.), представленная в исследованиях и отчетах Национальной ассоциации

демонтажных организаций (НАДО), Университета Минстроя НИИСФ РААСН, Европейской демонтажной ассоциации (EDA), Национального объединения производителей строительных материалов, изделий и конструкций (НОПСМ), Национальной ассоциации арендодателей строительной техники (НААСТ), Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ) и ООО «Конкуратор».

В ходе исследования и подготовки статьи взяты за основу системный и процессный подходы к управлению жизненным циклом инвестиционно-строительного проекта, применены методы наблюдения, описания, количественно-статистического анализа, сравнительно-сопоставительного анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В условиях активной реновации крупных городов применение инновационных моделей зданий позволяет сносить их быстро, безопасно, с минимальным дискомфортом для жителей плотной застройки, получая максимальное количество ликвидных вторичных материалов и минимум отходов.

Еще одна современная тенденция — освоение промзон, зачастую предполагающая снос старых промышленных объектов, включая объекты сложные и опасные. Ревитализация, представляющая собой преобразование заброшенных или неиспользуемых промышленных объектов в современные многофункциональные комплексы, также может требовать частичный демонтаж некоторых зданий, их частей, каких-либо конструкций, и наличие информационной модели здания существенно повышает скорость, качество и безопасность работ при снижении их стоимости.

При редевелопменте промышленных площадок BIM облегчает ряд специфических задач, в том числе:

- подсчет объемов демонтажных работ, а также объема образуемых отходов;
- контроль технического состояния зданий и сооружений, определение конструкций, которые нуждаются в дополнительном укреплении;
- совмещение сохраняемых, переносимых и демонтируемых инженерных коммуникаций;
- моделирование процессов демонтажа в условиях ограниченного пространства или отсутствия возможности создания динамических нагрузок;
- в случае привлечения к работе подрядчиков (завоз оборудования, вывоз отходов) возможность контроля их работы;
- осуществление технического и авторского надзора в режиме онлайн [5–7].

По подсчетам специалистов ФГИК «Размах» применение технологий информационного моделирования при подготовке территории после демонтажа к новому строительству позволяет сократить до 13 % проектных затрат без потери качества ра-

бот. При этом скорость реализации ИСП вырастает на 25–30 %¹.

По завершении проекта данные с разрешения заказчика сохраняются и используются для разработки и совершенствования нормативно-сметных форм и стандартов, разрабатываемых на базе ЕРЦ.

Следующая проблема, которая может быть решена с помощью ИТ, — это управление отходами, образующимися при демонтаже зданий. Еще в 2020 г. были приняты нормативные акты по Москве и Московской области, требующие, чтобы все отходы и способы их утилизации были представлены в цифровых информационных системах². Можно рассчитывать, что в будущем этот передовой опыт распространится и в других регионах страны.

В глобальном масштабе быстрое развитие урбанизации привело к растущему числу строительных отходов. Большинство этих отходов годами не подвергалось вторичному использованию, переработке и превращалось в захоронение мусора. Воздействие на окружающую среду данных отходов и нехватка земельных участков для создания новых площадок с целью захоронения увеличили потребность в инновационном подходе к управлению отходами. Многие ученые попытались решить эту проблему, например, предложив долгосрочное проектирование будущего разрушения здания (уже на стадии его проектирования). Распространение строительства из конструкций заводского изготовления также является эффективным решением для сокращения отходов на стройплощадке. Однако с развитием в городах мира программ реновации, ревитализации все больше невостребованных, ветхих, аварийных и потенциально опасных зданий стоят перед угрозой сноса. Актуальность управления строительными отходами приобрела новое звучание. Изучены результаты исследования, в которых авторы приводят и анализируют значительное количество примеров сноса жилых и промышленных зданий. Они все чаще высказываются в пользу применения информационных моделей для более точной оценки количества и состава строительных отходов, образующихся при демонтаже зданий и сооружений, а также количества выбрасываемых парниковых газов [8–11]. Ряд авторов предлагает создание целой информационной системы управления строительными отходами на основе BIM [12–14].

На сегодняшний день существует достаточно информации, подтверждающей экономическую эффективность внедрения BIM в демонтажную деятельность.

¹ Матрица в демонтаже: возможности применения BIM. URL: <https://dzen.ru/a/X8DUDKIBbV3X9rPQ?ysclid=mal6o2po5308100641>

² Строительные объекты и отходы: НАДО утилизировать правильно! // Агентство новостей «Строительный бизнес». URL: <https://ancb.ru/publication/read/11503>

Во многих исследованиях³ поднимается вопрос об эффективности применения BIM-технологий при реализации ИСП, причем в некоторых из них детально рассматривается использование информационных технологий на стадии демонтажа.

Также в пользу применения BIM-технологий свидетельствуют зарубежный опыт и опыт тех отечественных компаний, которые успели внедрить их в свою деятельность; различные исследования, проведенные авторами из разных стран.

При сносе здания 5000 м² с общей стоимостью работ 15–20 млн руб. экономия составит 1,5–3 млн руб. Инвестиции окупятся за 3–5 проектов, т.е. за 2–3 года, а цифровая платформа стоимостью 20–40 млн руб. — за 7–10 проектов при массовом использовании [15–21].

Еще одно преимущество внедрения ИТ — повышение безопасности работ [22]. Данный результат может быть достигнут благодаря:

1. Тестированию действий на компьютерной модели.

Цифровая модель здания содержит все необходимые сведения о его конструктивных особенностях: материале, плотности, размещении, состоянии каждого элемента, что позволяет протестировать на модели любое планируемое действие до того, как оно будет произведено в реальности.

2. Контролю технического состояния зданий и сооружений и их элементов.

Информационное моделирование BIM дает возможность определить те элементы и конструкции, которые нуждаются в дополнительном укреплении.

3. Симулированию процессов демонтажа.

Целесообразно и эффективно при производстве демонтажных работ в условиях ограниченного пространства или в отсутствии возможности создания динамических нагрузок⁴.

4. Оценке количества отходов.

BIM позволяет учесть объем строительных отходов при сносе, расходы на их утилизацию и транспортировку [23].

5. Разработке плана сноса и обращения с отходами.

³ Оценка применения BIM-технологий в строительстве. Результаты исследования эффективности применения BIM-технологий в инвестиционно-строительных проектах российских компаний : отчет. М., 2016. URL: <https://prombim.csd.ru/upload/iblock/d07/%D0%9E%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%86%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%B5%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20BIM%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D0%B9%20%D0%B2%20%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B5.pdf?ysclid=mal1kvsagl695918441>

⁴ Матрица в демонтаже: возможности применения BIM. URL: <https://dzen.ru/a/X8DUDKIBbV3X9rPQ?ysclid=mal6o2po5308100641>

Например, при обращении с опасными материалами (содержащими асбест, свойственный многим старым зданиям) можно составить график работ, при котором они будут демонтироваться и убираться с площадки в первую очередь [22].

Эффективность BIM при демонтаже заключается в ряде преимуществ, среди которых:

- повышение точности подсчета объемов демонтажа;
- более детальное визуальное обоснование включения элементов в демонтажную ведомость. 3D-инструменты помогают быстрее и проще доказать обоснованность демонтажа конструкции;
- высокая наглядность технической информации при работе специалистов в 3D-модели, которая позволяет «рассматривать» сооружение со всех сторон, что значительно упрощает и повышает качество работ по его демонтажу;
- снижение трудоемкости работ для проектировщиков, экономия времени и в конечном счете — сокращение сроков реализации проекта;
- сокращение риска появления ошибок благодаря динамическому учету изменений, что позволяет сэкономить время и уменьшить вероятность ошибки учета объемов в спецификации;
- возможность видеть не только отдельный объект или его элемент, подлежащий сносу, но и все конструкции смежных разделов⁵.

В организациях, где уже внедрены BIM-технологии, на протяжении ЖЦ объекта в его информационную модель добавляется информация, необходимая для бизнес-планирования, проектирования, материального обеспечения и разработки логистических схем, в том числе: данные инже-

нерных изысканий, сметы, планы графики, логистические схемы, сведения анализа социального и информационного фона, рабочая и юридическая документация, проект и модели инженерных систем и коммуникаций, ежедневные отчеты специалистов по техническому надзору. В рамках работы над проектом от концепции до сноса информация используется специалистами для анализа проектной документации и данных инженерных изысканий, поиска возможных коллизий, стандартизации и ускорения информационного обмена, визуальной инвентаризации, технического надзора и инспекций по охране труда, расчета транспортировки и движения материалов на площадке. Сформированная проектная группа работает со всей информацией по объекту в едином информационном поле, таким образом специалисты, задействованные в работе над проектом, одновременно получают информацию о вносимых изменениях, что исключает расхождения. По факту существует только один вариант проекта. Специалисты, непосредственно находящиеся на объекте, обязаны, используя мобильные устройства, регулярно предоставлять данные о показателях и выявленных изменениях⁵.

Более сложная ситуация складывается, когда демонтажу подлежат старые здания, проектирование и возведение которых происходили до появления BIM-технологий и которые не имеют информационных моделей (а таких зданий в настоящее время большинство и именно они массово сносятся). В таких случаях следует прежде всего оценить целесообразность оцифровки данных о здании (рис. 2).

В случае с простыми зданиями и сооружениями, в процессе демонтажа которых не ожидается проблем и опасностей, создание информационной модели нецелесообразно и экономически нерентабельно. Для них достаточно разработать недетализированный проект демонтажа.

⁵ Реализация проекта реконструкции промышленного объекта с применением nanoCAD BIM Конструкции. Опыт АО «СибИАЦ». URL: <https://sapr.ru/article/26785>

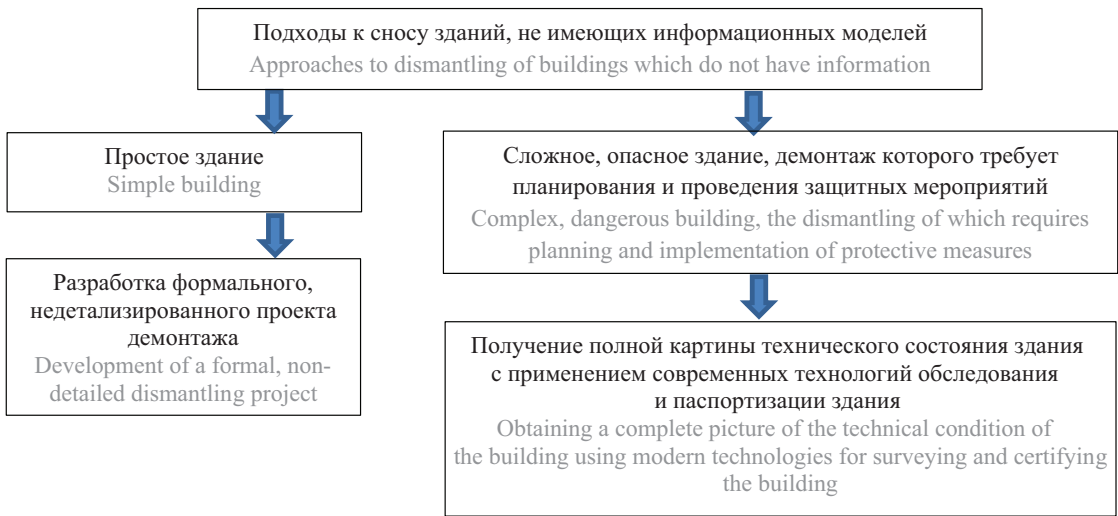


Рис. 2. Подходы к сносу старых зданий, не имеющих информационных моделей

Fig. 2. Approaches to dismantling of old buildings which do not have information models

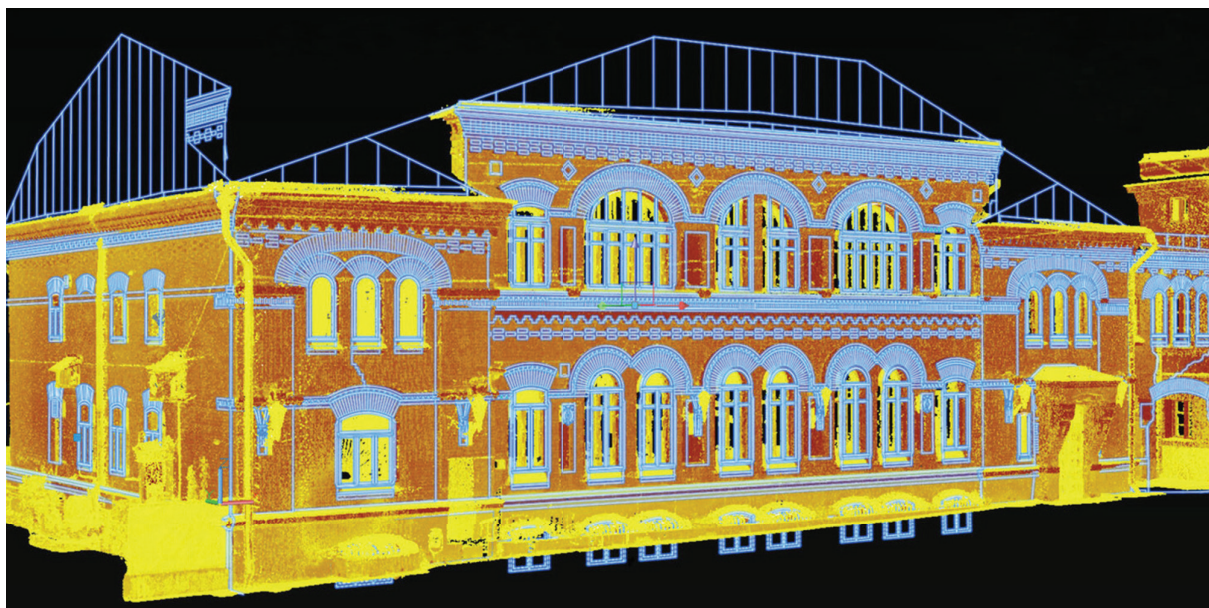


Рис. 3. Результат лазерного сканирования здания в виде облака точек

Fig. 3. The result of laser scanning of the building in the form of a point cloud

Если здание имеет сложную конструкцию, а его демонтаж может быть сопряжен с опасностями для рабочих и окружающих, необходимо получение полной и точной картины о его текущем техническом состоянии. Это возможно с помощью таких современных средств, как лазерное сканирование или фотограмметрия. При лазерном сканировании объект, подлежащий сносу, а также примыкающие к нему объекты оцифровываются и представляются в виде облака точек (рис. 3) [20].

Пользуясь полученной таким образом моделью, проектировщик может готовить проект демонтажа, даже не заходя в ветхое, аварийное здание.

Фотограмметрия (фотосъемка с помощью дронов или дистанционно управляемых фотокамер) также позволяет создать информационную модель конструкции здания и в дальнейшем разрабатывать проект демонтажа с использованием этой модели.

Пока в РФ нет возможности реализовать ИСП, который бы полностью был связан с BIM-технологиями от момента появления концепции до конца эксплуатации и сноса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Очевидно, что все возможности применения BIM-технологий при демонтаже зданий и сооружений еще не исчерпаны. Дальнейшее внедрение ИТ не только повысит эффективность собственно сноса, но и обеспечит последующее устойчивое строительство за счет оптимизации использования материальных, технических, трудовых и временных ресурсов, сокращения отходов, получения ликвидных материалов при сносе зданий, упрощения подготовки освободившейся площадки к новому строительству. Реальный эффект от перехода на цифровые техно-

логии в управлении ИСП на объектах, возводимых сегодня с применением инновационных методов, возможно будет ощутить через 10–15 лет по мере эксплуатации построенных объектов.

Для широкого распространения технологий информационного моделирования в демонтажной деятельности требуется преодоление барьеров, свойственных строительной отрасли в целом, включая разработку отечественного, не зависящего от зарубежных партнеров программного обеспечения, его удешевление; подготовку кадров, владеющих современными технологиями; и некоторых специфических барьеров, свойственных внедрению BIM-технологий (табл. 1).

Кроме того, в России существует и такая проблема, препятствующая более активному внедрению информационного моделирования, как зависимость от иностранного ПО, которое заключается в том, что многие программные продукты, поддерживающие BIM-процесс, являются зарубежными разработками и поэтому требуют адаптации для применения в условиях действующей российской нормативно-правовой базы. В условиях после введения антироссийских санкций 2022 г. и последующих лет встала необходимость не просто адаптации, а импортозамещения программных продуктов. И адаптация, и разработка собственных продуктов проходят успешно, однако необходимо понимать, что ПО отечественных разработок еще не может в полной мере конкурировать с иностранными цифровыми технологиями, поскольку не обладает пока всеми требуемыми функциями. Впрочем, прогресс в этом направлении, безусловно, есть: стоит отметить программу Pilot-BIM, способную автоматически собрать информационную модель здания на основе информации из разных источников.

Табл. 1. Основные группы барьеров на пути внедрения BIM-технологий в деятельность по демонтажу зданий (составлено авторами по работам [10, 24])

Table 1. Main groups of barriers on the way of implementation of the BIM-technologies to activities of buildings dismantling (created by the authors according to [10, 24])

Укрупненная группа барьеров Integrated group of barriers	Барьеры Barriers
Проблемы с программным обеспечением (ПО) BIM и со стандартами ПО Problems with the software for BIM and with the software standards	Недостаточная доступность многих типов программного обеспечения BIM и простота использования связанного программного обеспечения. Insufficient availability of many types of software for BIM and insufficient usability of the connected software. Значительная стоимость первоначальных инвестиций во внедрение BIM-технологий, продиктованная необходимостью приобретения дорогостоящего аппаратного и ПО. Considerable cost of initial investments into implementation of BIM technologies dictated by the need of acquisition expensive hardware and software. Риск информационных потерь или ошибки сведений при обмене данными между элементами ПО. Risk of information losses or error of data during data exchange between the software elements. Недостаточное соответствие между стандартами BIM-приложений и бизнес-требованиями строительных организаций Insufficient compliance among the standards of BIM-applications and business requirements of the construction organizations
Проблемы внедрения BIM-технологий через все стадии жизненного цикла проекта Problems of BIM technologies implementation through all the stages of project lifecycle	Большинство авторов теоретических трудов, как и руководители строительных организаций, внедряющих BIM, сосредотачивают внимание на изолированных стадиях строительного проекта при рассмотрении вопросов внедрения BIM-технологий и лишь немногие проводят исследование корреляции нескольких стадий ЖЦ проекта и проблем согласованного применения BIM на этих стадиях [25, 26]. Most of the authors of theoretical works, as well as the heads of the construction organizations, introducing BIM, focus attention on the isolated stages of the construction project during consideration of the matters of the implementation of BIM technologies and only a few conduct a piece of research of several stages of the project lifecycle correlation and to the problems of the approved application of BIM at those stages [25, 26]. Информация, используемая в рамках информационного моделирования на разных стадиях ЖЦ проекта, неоднородна, сложна для передачи и последующей интерпретации (например, передача информации со стадии проектирования на стадию эксплуатации, а после ее завершения на стадию проектирования демонтажа и осуществления работ по сносу [26]). The information, used within the information modelling during different stages of project lifecycle is non-uniform, it is difficult for transfer and subsequent interpretation (for example, information transfer from the blueprint stage on the operation stage, and after its end to the blueprint stage of dismantling and implementation of works on demolition [26]). На разных стадиях строительного проекта практическая ценность применения BIM неодинаково очевидна. Лучше всего она обоснована для этапа проектирования. А стадия демонтажа является в этом смысле «антилидером», для которого сложно конкретизировать и количественно определить показатели эффективности применения BIM During different stages of the construction project the practical value of application of BIM is not equally obvious. It is proved for the blueprint stage best of all. Meanwhile the stage of dismantling is the “anti-leader” for which it is difficult to concretize and to define quantitatively the indicators of the efficiency of BIM application
Кадровые проблемы Personnel issues	Недостаток кадров для работы с BIM-технологиями. Несоответствие квалификации персонала требованиям к работе. Lack of the personnel for work with BIM technologies. Discrepancy of qualification of the personnel to the job requirements. Несовершенство системы профессиональной подготовки специалистов к работе с BIM: отсутствие направления подготовки в вузах, тематических программ, учебных материалов, недостаток научно-педагогических кадров, имеющих знания и опыт работы с BIM и способных передавать их далее Imperfection of the system of professional training of specialists to work with BIM: absence of the direction of preparation in higher education institutions, thematic programmes, learning materials, lack of the research-and-educational personnel, having knowledge and work experience in BIM and capable to transfer them further

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 9, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 9, 2025

Укрупненная группа барьеров Integrated group of barriers	Барьеры Barriers
Организационные проблемы Organisational challenges	Необходимость организационных инноваций, потребностей в новых функциях и даже новых должностях, таких как BIM-менеджер и BIM-координатор строительной организации. Затратность и трудоемкость таких мероприятий, способных временно приводить к снижению эффективности труда в организации. Need of organizational innovations, needs for new functions and even new positions, such as BIM-manager and BIM-coordinator in the construction organization. The cost intensity and labour input of such actions can temporarily lead to the decrease in the efficiency of work in the organization. Сопrotивление изменениям, приверженность привычным методам проектирования, планирования и управления инвестиционно-строительными проектами и неготовность к инновациям сотрудников и даже руководства многих строительных организаций [27] Resistance to changes, commitment to usual design methods, planning and management of investment-and-construction projects and unavailability to innovations from the employees and even from the managers of many construction organizations [27]

В качестве снятия еще одного барьера следует совершенствовать нормативно-правовую базу для применения BIM в демонтажных работах. Некоторые нормативно-правовые документы содержат правовые основы для применения BIM в демонтажных работах (табл. 2).

Как видно, проведена значительная работа, но для дальнейшего развития демонтажного бизнеса он нуждается в более мощном собственном, тематическом правовом регулировании, которое учитывало бы специфику этой деятельности.

Таким образом, наиболее перспективными направлениями исследований по проблемам внедрения и применения BIM-технологий в демонтажной

деятельности, а также практической работы в данной области представляются:

- 1) совершенствование нормативно-правового регулирования в этой области;
- 2) разработка качественного и доступного по ценам отечественного ПО;
- 3) интерпретация демонтажа как неотъемлемой части процесса реализации ИСП и координация применения BIM-технологий на всех стадиях проекта;
- 4) преодоление кадрового дефицита для внедрения и применения BIM-технологий в демонтажной деятельности, преодоление сопротивления изменениям в строительных организациях;

Табл. 2. Основные нормативно-правовые документы, затрагивающие вопросы демонтажа и, в частности, применения BIM в демонтажных работах (составлено авторами)

Table 2. Main standard-and-legal documents concerning the matters of dismantling and particularly application of BIM during the dismantling works (created by the authors)

Наименование Name	Содержание Contents
Постановление Правительства России от 16.02.2008 № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» Order of the Government of the Russian Federation, February 16, 2008 No. 87 “The structure of sections of the project documentation and requirements to their contents”	Общие требования к организации работ по сносу или демонтажу зданий, строений и сооружений объектов капитального строительства General requirements to the organization of works on demolition or dismantling of buildings and structures within the capital construction projects
СТО НОСТРОЙ 2.33.53–2011 «Организация строительного производства. Снос (демонтаж) зданий и сооружений» Standard STO NOSTROY 2.33.53–2011 “Organization of construction production. Demolition (dismantling) of buildings and structures”	Стандарт организации. Требования к производству работ по сносу или демонтажу зданий, строений и сооружений объектов капитального строительства Standard of the organization. Requirements to works on demolition or dismantling of buildings and structures within the capital construction projects
Градостроительный кодекс РФ, глава 6.4 «Снос объектов капитального строительства» City-planning Code of the Russian Federation, Chapter 6.4 “Demolition of Capital Construction Objects”	Понятие лица, осуществляющего демонтаж здания/сооружения. Требования к статусу лиц, имеющих право осуществлять демонтаж Concept of the person, performing dismantling of a building/structure. Requirements to the status of the persons having the right to perform dismantling

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Наименование Name	Содержание Contents
Постановление Правительства РФ от 17.05.2024 № 614 «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». Действует с 01.09.2024 до 01.09.2030 Order of the Government of the Russian Federation of May 17, 2024 No. 614. “The approval of Rules of forming and maintaining the information model of a capital construction object, the scope of information, documents and materials included in the information model of a capital construction object and represented in the form of electronic documents, and requirements to formats of the specified electronic documents”. Works from 01.09.2024 till 01.09.2030	Правила создания информационной модели здания и ее ведения. Состав сведений, документов и материалов, включаемых в информационную модель. Требования к электронным документам Rules of creation of an information model of the building and its maintaining. The scope of information, the documents and materials included in the information model. Requirements to electronic documents
Приказ Минстроя РФ от 4.08.2020 № 421/пр «Об утверждении методики определения сметной стоимости строительства, реконструкции, капитального ремонта, сноса объектов капитального строительства, работ по сохранению объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации на территории Российской Федерации» Order of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation, August 4, 2020 No. 421 “The statement of the technique of determination of estimated cost of construction, reconstruction, capital repairs, demolition of capital construction projects, works on preserving of objects of cultural heritage (historical and cultural monuments) of the people of the Russian Federation in the territory of the Russian Federation”	Утверждает методику определения сметной стоимости строительства, реконструкции, капитального ремонта, сноса объектов капитального строительства и работ по сохранению объектов культурного наследия. В методике предусматривается возможность включения затрат, связанных с использованием технологий информационного моделирования, в сводный сметный расчет Approves the technique of determination of estimated cost of construction, reconstruction, capital repairs, demolition of capital construction objects and works on preserving of objects of cultural heritage. The technique provides the possibility of inclusion of the costs, connected with use of technologies of information modelling, in the summary estimate
СП 471.1325800.2019 «Информационное моделирование в строительстве» Construction Rules 471.1325800.2019 “Information modelling in construction”	Содержит требования к информационным моделям объектов капитального строительства и работе с ними для сбора, обработки и хранения информации о качестве производства различных строительных работ Requirements to information models of capital construction objects and work with them for collecting, processing and storage of information on quality of production of various construction works

5) концентрация внимания на возможностях BIM-технологий не только в вопросах проектирования (а соответственно — конструктивных особенностей здания, подлежащего сносу, и разработки проекта демонтажа), в представлении особенностей сносимого здания (что является логичным продолжением освоения BIM-технологий в проектировании, возведении и эксплуатации зданий), но и на возможностях повышения эффективности управления строительными отходами:

- реализации принципа бережливого производства (lean construction);
- снижения воздействия строительства и сноса зданий на окружающую среду, а следовательно, —

получение положительного социального и экологического эффекта;

- формирования последовательной системы управления строительными отходами, работающей на основе BIM, для управления идентификацией, оценкой, транспортировкой, переработкой отходов, и процессами сбора данных об отходах на всем протяжении сноса для достижения поддерживаемой утилизации отходов;
- объединения BIM-технологий с GIS для разработки системы контроля транспортировкой строительных отходов и эффективного управления ими в режиме реального времени.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Васильева Е.Ю., Бизина Е.И. Применение BIM-технологий в жилищном строительстве в РФ // Строительство и архитектура. 2023. Т. 11. № 4. С. 37. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-4-37-37. EDN OMYKEA.
2. Ожгибесова К.Е., Мингареева Р.Р., Сондueva С.Р. Технологии информационного моделирования (ТИМ) в строительстве РФ: особенности применения на различных стадиях жизненного цикла объекта // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2021. № 11–1. С. 157–159. DOI: 10.23672/t7479-5092-7107-a. EDN YVOGXG.
3. Bogdanov A., Zaitsev V., Khalitova K. Application of BIM-technologies during the construction and operation of buildings and structures // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 274. P. 06009. DOI: 10.1051/e3sconf/202127406009
4. Aryani Y., Purwana R., Herdiansyah H., Suryabrata J. A Bridging the gap in green building research: the role of post occupancy evaluation // Urbanism. Architecture. Constructions. 2025. Vol. 16. Issue 1. Pp. 27–50.
5. Cheng J.C.P., Ma L.Y.H. A BIM-based system for demolition and renovation waste estimation and planning // Waste Management. 2013. Vol. 33. Issue 6. Pp. 1539–1551. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.01.001
6. Jayasinghe L.B., Waldmann D. Development of a BIM-Based Web Tool as a Material and Component Bank for a Sustainable Construction Industry // Sustainability. 2020. Vol. 12. Issue 5. P. 1766. DOI: 10.3390/SU12051766
7. Kresnanto N.C., Ramadhan R.I., Willdan M., Putra P.B.P. BIM's Contribution as A Sustainable Construction Accelerator // Applied Research on Civil Engineering and Environment (ARCEE). 2023. Vol. 4. Issue 1. Pp. 38–52. DOI: 10.32722/ARCEE.V4I01.5333
8. Li C.Z., Zhen Y., Wu H., Chen Z., Xiao B., Tam V.W.Y. The application of BIM in the AECO industry // Journal of Civil Engineering and Management. 2023. Vol. 29. Issue 3. Pp. 202–222. DOI: 10.3846/jcem.2023.18076
9. Bakchan A., Faust K.M. Construction waste generation estimates of institutional building projects: Leveraging waste hauling tickets // Waste Management. 2019. Vol. 87. Pp. 301–312. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.02.024
10. Guerra B.C., Bakchan A., Leite F., Faust K.M. BIM-based automated construction waste estimation algorithms: The case of concrete and drywall waste streams // Waste Management. 2019. Vol. 87. Pp. 825–832. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.03.010
11. Xu J., Shi Y., Xie Y.C., Zhao S.W. A BIM-based construction and demolition waste information management system for greenhouse gas quantification and reduction // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 229. Pp. 308–324. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.158
12. Шилкина С.В. BIM-технологии в решении проблем управления строительными отходами // Строительство и архитектура. 2023. Т. 11. № 1. С. 6. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-11-1-6-6. EDN IHUCG.
13. Ibe C.N. Implementing BIM Technology for Effective Construction and Demolition Waste Management // 2024 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech). 2024. Pp. 204–211. DOI: 10.1109/sustech60925.2024.10553546
14. Liphadzi N.M., Musonda I., Onososen A. The use of building information modelling tools for effective waste management : a systematic review // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1101. Issue 6. P. 062001. DOI: 10.1088/1755-1315/1101/6/062001
15. Giel B., Issa R. Return on Investment Analysis of Using Building Information Modeling in Construction // Journal of Computing in Civil Engineering. 2013. Vol. 27. Issue 5. Pp. 511–521. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000164
16. Neelamkavil J., Ahamed S. The Return on Investment from BIM-driven Projects in Construction. 2012. DOI: 10.4224/20374669
17. Hamidi B., Bulbul T., Pearce A., Thabet W. Potential Application of BIM in Cost-Benefit Analysis of Demolition Waste Management // Construction Research Congress 2014. 2014. Pp. 279–288. DOI: 10.1061/9780784413517.029
18. Chahrour R., Hafeez M.A., Ahmad A.M., Sulieman H.I., Dawood H., Rodriguez-Trejo S. et al. Cost-benefit analysis of BIM-enabled design clash detection and resolution // Construction Management and Economics. 2021. Vol. 39. Issue 1. Pp. 55–72. DOI: 10.1080/01446193.2020.1802768
19. Zou Y., Feng W. Cost optimization in the construction of prefabricated buildings by using BIM and finite element simulation // Soft Computing. 2023. Vol. 27. Issue 14. Pp. 10107–10119. DOI: 10.1007/S00500-023-08239-0
20. Liu S., Meng X., Tam C. Building Information Modeling Based Building Design Optimization for Sustainability // Energy and Buildings. 2015. Vol. 105. Pp. 139–153. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.037
21. Farnsworth C.B., Beveridge S., Miller K.R., Christofferson J.R. Application, Advantages, and Methods Associated with Using BIM in Commercial Construction // International Journal of Construction Education and Research. 2015. Vol. 11. Issue 3. Pp. 218–236. DOI: 10.1080/15578771.2013.865683
22. Wetzel E.M., Thabet W.Y. The use of a BIM-Based Framework to Support Safe Facility Management Processes // Automation in Construction. 2015. Vol. 60. Pp. 12–24. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.09.004
23. Avsatthi B. Top 8 BIM Technology Trends That Will Dominate the AEC Industry // AECbytes. 2023. URL: https://www.aecbytes.com/viewpoint/2023/issue_110.html
24. Ge X.J., Livesey P., Wang J., Huang S., He X., Zhang C. Deconstruction waste management through 3d reconstruction and BIM: a case study // Visualization

in Engineering. 2017. Vol. 5. Issue 1. DOI: 10.1186/s40327-017-0050-5

25. Lee H.W., Oh H., Kim Y., Choi K. Quantitative Analysis of Warnings in Building Information Modeling (BIM) // *Automation in Construction*. 2015. Vol. 51. Pp. 23–31. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.12.007

26. Луняков М.А., Бакрунов Ю.О., Васильева Е.Ю. Инновации в проведении мониторинга ин-

женерно-технического оборудования жилых зданий на этапе эксплуатации // *Финансовая экономика*. 2022. № 4. С. 298–303. EDN OFPVOK.

27. Васильева Е.Ю., Большаков Р.А., Кожухов Л.Е., Чижова А.Ю. Процесс внедрения инновационных технологий в деятельность строительной организации // *Финансовый менеджмент*. 2025. № 2. С. 12–24. EDN KAEGFF.

Поступила в редакцию 16 мая 2025 г.

Принята в доработанном виде 7 июля 2025 г.

Одобрена для публикации 7 июля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Елена Юрьевна Васильева — кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента и инноваций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 702671, Scopus: 57192662530, ResearcherID: AAD-1693-2019, ORCID: 0000-0001-7797-1954; elena.chibisova_metr@mail.ru;

Яну Ариани — докторант школы наук об окружающей среде; Университет Индонезии; г. Депока, Индонезия; главный редактор; журнал «Environmental Quality and Green Building»; yanu.aryani11@ui.ac.id.

Вклад авторов:

Васильева Е.Ю. — идея, сбор материала, написание статьи, научное редактирование и оформление статьи.

Ариани Яну — сбор материала, научное редактирование, сбор библиографии по теме исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Vasil'eva E., Bizina E. Use of BIM technologies in the house construction in the Russian Federation. *Construction and Architecture*. 2023; 11(4):37. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-4-37-37. EDN OMYKEA. (rus.).

2. Ozhgibesova K.E., Mingareeva R.R., Sondueva S.R. Information modeling technologies (TIM) in the construction of the Russian Federation: features of application at various stages of the object's life cycle. *Humanitarian, Socio-economic and Social Sciences*. 2021; 11-1:157-159. DOI: 10.23672/t7479-5092-7107-a. EDN YVOGXG. (rus.).

3. Bogdanov A., Zaitsev V., Khalitova K. Application of BIM-technologies during the construction and operation of buildings and structures. *E3S Web of Conferences*. 2021; 274:06009. DOI: 10.1051/e3sconf/202127406009

4. Aryani Y., Purwana R., Herdiansyah H., Suryabrata J.A. Bridging the gap in green building research: the role of post occupancy evaluation. *Urbanism. Architecture. Constructions*. 2025; 16(1):27-50.

5. Cheng J.C.P., Ma L.Y.H. A BIM-based system for demolition and renovation waste estimation and planning. *Waste Management*. 2013; 33(6):1539-1551. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.01.001

6. Jayasinghe L.B., Waldmann D. Development of a BIM-Based Web Tool as a Material and Component Bank for a Sustainable Construction Industry. *Sustainability*. 2020; 12(5):1766. DOI: 10.3390/SU12051766

7. Kresnanto N.C., Ramadhan R.I., Willdan M., Putra P.B.P. BIM's Contribution as A Sustainable Con-

struction Accelerator. *Applied Research on Civil Engineering and Environment (ARCEE)*. 2023; 4(1):38-52. DOI: 10.32722/ARCEE.V4I01.5333

8. Li C.Z., Zhen Y., Wu H., Chen Z., Xiao B., Tam V.W.Y. The application of BIM in the AECO industry. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2023; 29(3):202-222. DOI: 10.3846/jcem.2023.18076

9. Bakchan A., Faust K.M. Construction waste generation estimates of institutional building projects: Leveraging waste hauling tickets. *Waste Management*. 2019; 87:301-312. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.02.024

10. Guerra B.C., Bakchan A., Leite F., Faust K.M. BIM-based automated construction waste estimation algorithms: The case of concrete and drywall waste streams. *Waste Management*. 2019; 87:825-832. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.03.010

11. Xu J., Shi Y., Xie Y.C., Zhao S.W. A BIM-based construction and demolition waste information management system for greenhouse gas quantification and reduction. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 229:308-324. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.158

12. Shilkina S. BIM-technologies in solving the problems of construction waste management. *Construction and Architecture*. 2023; 11(1):6. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-11-1-6-6. EDN IHDUCG. (rus.).

13. Ibe C.N. Implementing BIM Technology for Effective Construction and Demolition Waste Management. *2024 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*. 2024; 204-211. DOI: 10.1109/sustech60925.2024.10553546

14. Liphadzi N.M., Musonda I., Onososen A. The use of building information modelling tools for effective waste management : a systematic review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 1101(6):062001. DOI: 10.1088/1755-1315/1101/6/062001
15. Giel B., Issa R. Return on Investment Analysis of Using Building Information Modeling in Construction. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2013; 27(5):511-521. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000164
16. Neelamkavil J., Ahamed S. *The Return on Investment from BIM-driven Projects in Construction*. 2012. DOI: 10.4224/20374669
17. Hamidi B., Bulbul T., Pearce A., Thabet W. Potential Application of BIM in Cost-Benefit Analysis of Demolition Waste Management. *Construction Research Congress 2014*. 2014; 279-288. DOI: 10.1061/9780784413517.029
18. Chahrour R., Hafeez M.A., Ahmad A.M., Suliman H.I., Dawood H., Rodriguez-Trejo S. et al. Cost-benefit analysis of BIM-enabled design clash detection and resolution. *Construction Management and Economics*. 2021; 39(1):55-72. DOI: 10.1080/01446193.2020.1802768
19. Zou Y., Feng W. Cost optimization in the construction of prefabricated buildings by using BIM and finite element simulation. *Soft Computing*. 2023; 27(14):10107-10119. DOI: 10.1007/S00500-023-08239-0
20. Liu S., Meng X., Tam C. Building Information Modeling Based Building Design Optimization for Sustainability. *Energy and Buildings*. 2015; 105:139-153. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.037
21. Farnsworth C.B., Beveridge S., Miller K.R., Christofferson J.R. Application, Advantages, and Methods Associated with Using BIM in Commercial Construction. *International Journal of Construction Education and Research*. 2015; 11(3):218-236. DOI: 10.1080/15578771.2013.865683
22. Wetzel E.M., Thabet W.Y. The use of a BIM-Based Framework to Support Safe Facility Management Processes. *Automation in Construction*. 2015; 60:12-24. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.09.004
23. Avsatthi B. Top 8 BIM Technology Trends That Will Dominate the AEC Industry. *AECbytes*. 2023. URL: https://www.aecbytes.com/viewpoint/2023/issue_110.html
24. Ge X.J., Livesey P., Wang J., Huang S., He X., Zhang C. Deconstruction waste management through 3d reconstruction and BIM: a case study. *Visualization in Engineering*. 2017; 5(1). DOI: 10.1186/s40327-017-0050-5
25. Lee H.W., Oh H., Kim Y., Choi K. Quantitative Analysis of Warnings in Building Information Modeling (BIM). *Automation in Construction*. 2015; 51:23-31. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.12.007
26. Lunyakov M.A., Bakrunov Yu.O., Vasilyeva E.Yu. Innovations in carrying out monitoring of the technical equipment of residential buildings at the maintenance stage. *Financial Economy*. 2022; 4:298-303. EDN OFPVOK. (rus.).
27. Vasilyeva E.Yu., Bolshakov R.A., Kozhukhov L.E., Chizhova A.Yu. Process of implementation of the innovation technologies in the construction organization activity. *Financial Management*. 2025; 2:12-24. EDN KAEGFF. (rus.).

Received May 16, 2025.

Adopted in revised form on July 7, 2025.

Approved for publication on July 7, 2025.

BIONOTES: **Elena Yu. Vasilyeva** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 702671, Scopus: 57192662530, ResearcherID: AAD-1693-2019, ORCID: 0000-0001-7797-1954; elena.chibisova_metr@mail.ru;

Yanu Aryani — Doctoral student of the School of Environmental Sciences; **University of Indonesia**; Depok, Indonesia; Chief Editor; Journal “Environmental Quality and Green Building”; yanu.aryani11@ui.ac.id.

Contribution of the authors:

Elena Yu. Vasilyeva — idea, material collecting, writing of the article, scientific editing and formatting of the article.

Yanu Aryani — material collecting, scientific editing, references collecting on the research topic.

Authors report about the absence of conflict of interests.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 338.4

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1443-1454

Инструменты контроля стоимости при реализации проектов подрядными организациями

Александра Евгеньевна Лебедева¹, Ирина Викторовна Каракозова¹,
Мирал Альшрайдех²

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

² Университет Аль-аль-Байт; г. Мафрак, Иордания

АННОТАЦИЯ

Введение. При оценке стоимости инвестиционно-строительного проекта разрабатываются сметные расчеты, а затем как один из инструментов контроля стоимости для подрядных организаций применяется бюджет проекта. Бюджет строительного проекта в подрядных организациях используется для оценки рентабельности реализации проекта, повышения эффективности управления материальными и финансовыми ресурсами, а также оценки потенциала проектных решений. Он разрабатывается на основе сметного расчета, но имеет отличия в структуре и содержании, которые приводятся в настоящем исследовании.

Материалы и методы. Выполнен сравнительный анализ структуры и содержания сметного расчета и бюджета инвестиционно-строительного проекта в подрядной организации. Рассмотрено применение бережливых (lean) подходов и методов при планировании реализации проекта подрядными организациями, в частности, к оценке и бюджетированию проекта в подрядных организациях.

Результаты. Приводятся понятие бюджета проекта в подрядной организации, а также описание процесса его создания, рассмотрены функции бюджета проекта. Выявлены и представлены принципиальные отличия сметного расчета и бюджета проекта, их структуры и функций. На примере проекта строительства тепловой сети в г. Москве проведен сравнительный анализ сметного расчета, бюджета проекта и фактических затрат на реализацию проекта.

Выводы. Разработка бюджета для каждого проекта необходима с целью внутреннего контроля затрат на реализацию проекта в подрядной организации, применение подхода бережливого строительства предлагает эффективные инструменты для сокращения издержек и достижения планируемой рентабельности для подрядных организаций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бюджет строительного проекта, управление проектами, контроль стоимости строительства, бережливое строительство, target costing, концептуально-семантическая модель контроля стоимости строительства, договор подряда

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лебедева А.Е., Каракозова И.В., Альшрайдех М. Инструменты контроля стоимости при реализации проектов подрядными организациями // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 9. С. 1443–1454. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1443-1454

Автор, ответственный за переписку: Александра Евгеньевна Лебедева, uncea@yandex.ru.

Cost control tools in project implementation by contractors

Aleksandra E. Lebedeva¹, Irina V. Karakozova¹, Miral Al-Shraideh²

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

² Al al-Bayt University; Mafrak, Jordan

ABSTRACT

Introduction. For assessing the cost of construction project, cost estimates are developed, and then the project budget is used as one of the cost control tools for contracting organizations. The construction project budget in contracting organizations is used to assess the profitability of project implementation, improve the efficiency of material and financial resource management, and assess the potential of project solutions. It is developed on the basis of cost estimates, but has differences in structure and content, which are given in this paper.

Materials and methods. The paper provides a comparative analysis of the structure and content of the estimate calculation and budget of an investment and construction project in a contracting organization. The application of lean approaches and methods in planning the implementation of a project by contracting organizations is considered, in particular, in assessing and budgeting a project in contracting organizations.

Results. The paper provides the concept of a project budget in a contracting organization, as well as a description of the process of its creation, and considers the functions of the project budget. During the study, fundamental differences between the estimate calculation and the project budget, their structure and functions were identified and described. Using the exam-

ple of a heating network construction project in Moscow, a comparative analysis of the estimate calculation, project budget and actual data on the implementation of the project was made.

Conclusions. The development of a budget for each project is necessary for internal control of project implementation costs in a contracting organization, and the use of a lean construction approach offers effective tools for reducing costs and achieving the planned profitability for contracting organizations.

KEYWORDS: construction project budget, project management, construction cost control, lean construction, target costing, conceptual-semantic model of construction cost control, construction contract

FOR CITATION: Lebedeva A.E., Karakozova I.V., Al-Shraideh M. Cost control tools in project implementation by contractors. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(9):1443-1454. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1443-1454 (rus.).

Corresponding author: Aleksandra E. Lebedeva, uncea@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время бережливый подход является наиболее востребованной системой в производственном менеджменте [1] в целях повышения конкурентоспособности и рентабельности организаций. Бережливый подход впервые был предложен в послевоенной Японии инженером компании Toyota Тайити Оно. В середине 1950-х гг. он начал выстраивать особую систему организации производства, которая впоследствии получила название Toyota Production System (TPS), а в западной интерпретации стала известна как Lean production [2]. К ключевым принципам данной концепции следует отнести:

- устранение потерь (Muda, в английской интерпретации Waste);
- выравнивание производственных потоков;
- непрерывное совершенствование (Кайдзен (Kaizen));
- ориентация на создание ценности для клиента.

Эти принципы показали свою универсальность и стали активно переноситься из сферы промышленного производства в другие отрасли.

Преобразование бережливого производства в бережливое строительство (Lean Construction) произошло за счет адаптации и трансформации методологических основ и инструментария этого подхода к специфике строительного производства. Это стало возможным благодаря тому, что в 1990-х гг. специалисты, в частности финский исследователь Лаури Коскела [3], сформулировали и обосновали необходимость применения принципов бережливого производства в строительстве, где высоки степень уникальности продукции, неопределенность и сложность организации процессов.

Бережливое строительство представляет собой методологию, которая основана на минимизации потерь и повышении эффективности через систематическое управление процессами [4–6]. Оно включает в себя несколько методов, направленных на повышение эффективности и снижение потерь в строительных проектах:

- метод Target costig используется для определения цели по снижению затрат на базе рыночных условий и потребностей клиента [7];

- метод Activity-Based Costing (ABC) применяется для установления себестоимости продукции или услуги на основе конкретных видов деятельности [8];

- Value Stream Mapping (VSM) — инструмент, используемый для анализа и оптимизации потоков создания ценности для выявления и устранения неэффективных процессов [9];

- Канбан — система управления потоком материалов и работ по реализации проекта, основанная на принципе «вытягивающего производства» [10];

- метод Last Planner System (LPS) используется при планировании работ и процессов, отталкиваясь от даты завершения, т.е. в обратном порядке в отличие от традиционного подхода планирования с даты начала работ [11].

Строительная продукция уникальна, поскольку она создается по индивидуальному заказу для конкретного заказчика. Уникальность также обуславливается природно-климатическими условиями земельного участка, которые отличаются по сейсмическим и метеорологическим условиям, юридическому статусу, местным законам, существующей инфраструктуре и другим параметрам. При оценке стоимости реализации строительного проекта в зависимости от источника финансирования применяются сметные нормативы или коммерческие расценки по видам работ, которые формируют сметную стоимость строительства для заключения договора подряда, на базе сметной документации подрядной организацией разрабатывается бюджет проекта.

Главной статьей в сметном нормировании и ценообразовании для подрядной организации является себестоимость работ, формируемая посредством суммирования прямых затрат и накладных расходов. Если величина прямых затрат в сметной документации формируется на основе объемов работ, принятых в проектной документации, и стоимостных показателей таких работ, то величина накладных расходов исчисляется косвенным путем в процентах от фонда оплаты труда рабочих. Такой подход к расчету накладных расходов приемлем при планировании величины предстоящих затрат, но в практической деятельности подрядных организаций создает сложности в связи с отсутствием постатейной раскладки всех статей затрат в составе накладных расходов

и описания порядка их расчета при разработке проектной документации. Таким образом, подрядной строительной организации целесообразно иметь свои инструменты планирования и контроля величин прямых затрат и накладных расходов, используемых в дальнейшем при разработке бюджета проекта.

Вопрос о теоретической основе для бюджетирования строительных проектов возник в результате появления target costing (англ. целевой себестоимости разработки продукта) к строительным проектам [12]. Целевая себестоимость впервые была успешно применена в строительстве в 2002 г. [13]. В отличие от многих отраслей, в строительстве бюджетирование основывается не на прогнозируемых объемах продаж, а на планируемых объемах строительства. В промышленности при разработке продукта бюджет определяется производителем на базе целевой рентабельности, а в строительстве бюджет проекта, как правило, устанавливается заказчиками на основе того, что они готовы и могут потратить для достижения своих целей при реализации проекта.

При составлении бюджетов строительных проектов приходится решать две противоположные задачи: с одной стороны, необходимо обеспечить достаточный объем финансирования для успешной реализации проекта, с другой — минимизировать затраты на строительство.

В публикациях, посвященных вопросу оценки эффективности проекта, содержится информация об использовании двух подходов, а именно, оценка, основанная на ценности созданного актива, т.е. на ценности, предоставленной заказчику проекта [14], и оценка на основе фактической производительности по сравнению с бюджетом и графиком проекта [15]. Такое разделение отражает противоречивые цели при составлении бюджета проекта.

Вероятность того, что фактические затраты на реализацию проекта окажутся в пределах бюджета (допустимая стоимость), зависит от двух факторов:

1. Разница между фактическими ценами на ресурсы и бюджетом, т.е. чем точнее спрогнозирова-

ны цены на этапе составления бюджета проекта, тем больше вероятность, что фактические затраты будут соответствовать запланированным.

2. Сложность и неопределенность проекта. Чем сложнее проект, тем больше вероятность, что подрядчики будут вынуждены поднять цены, чтобы снизить свои риски. Также дополнительные требования увеличивают фактическую стоимость проекта.

Отдельно уделяется внимание виду и содержанию подрядного договора. Существует несколько видов договоров подряда, содержащих отличительные положения по расчету стоимости проекта и составу рисков (табл. 1).

При заключении договора с твердой ценой для подрядчика стимулом служит сокращение его затрат с целью увеличения прибыли, что может привести к снижению качества при реализации проекта. Следовательно, контракты с твердой ценой — надежная стратегия ограничения затрат только для относительно определенных и простых проектов, где риски низкие или отсутствуют.

В практике строительства наиболее распространенным для частных инвесторов является вид договоров подряда с фиксированными расценками, а для государственных заказов — с твердой ценой.

Договор с фиксированными расценками по видам работ предпочтительнее с точки зрения интересов подрядной компании, так как риски, связанные с недостатком финансирования, для подрядчика минимальны. Для таких договоров коммерческое предложение содержит детальную расшифровку состава работ и стоимость за единицу их выполнения по рыночным ценам. Стоимость материалов зачастую выносится отдельной строкой и в случае удорожания подрядная компания может выставить счета заказчику по фактическим ценам закупки независимо от цены, указанной в договоре.

На рис. 1 приведена концептуально-семантическая модель контроля стоимости проекта при его реализации подрядными организациями.

Табл. 1. Виды договоров подряда

Table 1. Types of contracts

Вид договора подряда Type of contract	Условия формирования стоимости проекта Conditions for determining the cost of the project	Характеристика риска Risk Characteristics
Договор с фиксированными расценками на виды работ Contract with fixed prices for types of work	Общая стоимость проекта может меняться в зависимости от фактически выполненного объема работ The total cost of the project may vary depending on the actual volume of work performed	Риски по удорожанию стоимости работ несет заказчик The risks of increasing the cost of the project are borne by the customer
Договор с твердой ценой (англ. Lumpsum) Lumpsum	Устанавливается фиксированная стоимость реализации проекта A fixed cost for project implementation is established	Все риски по удорожанию стоимости работ несет подрядчик All risks of increasing the cost of the project are borne by the contractor

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 9, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 9, 2025

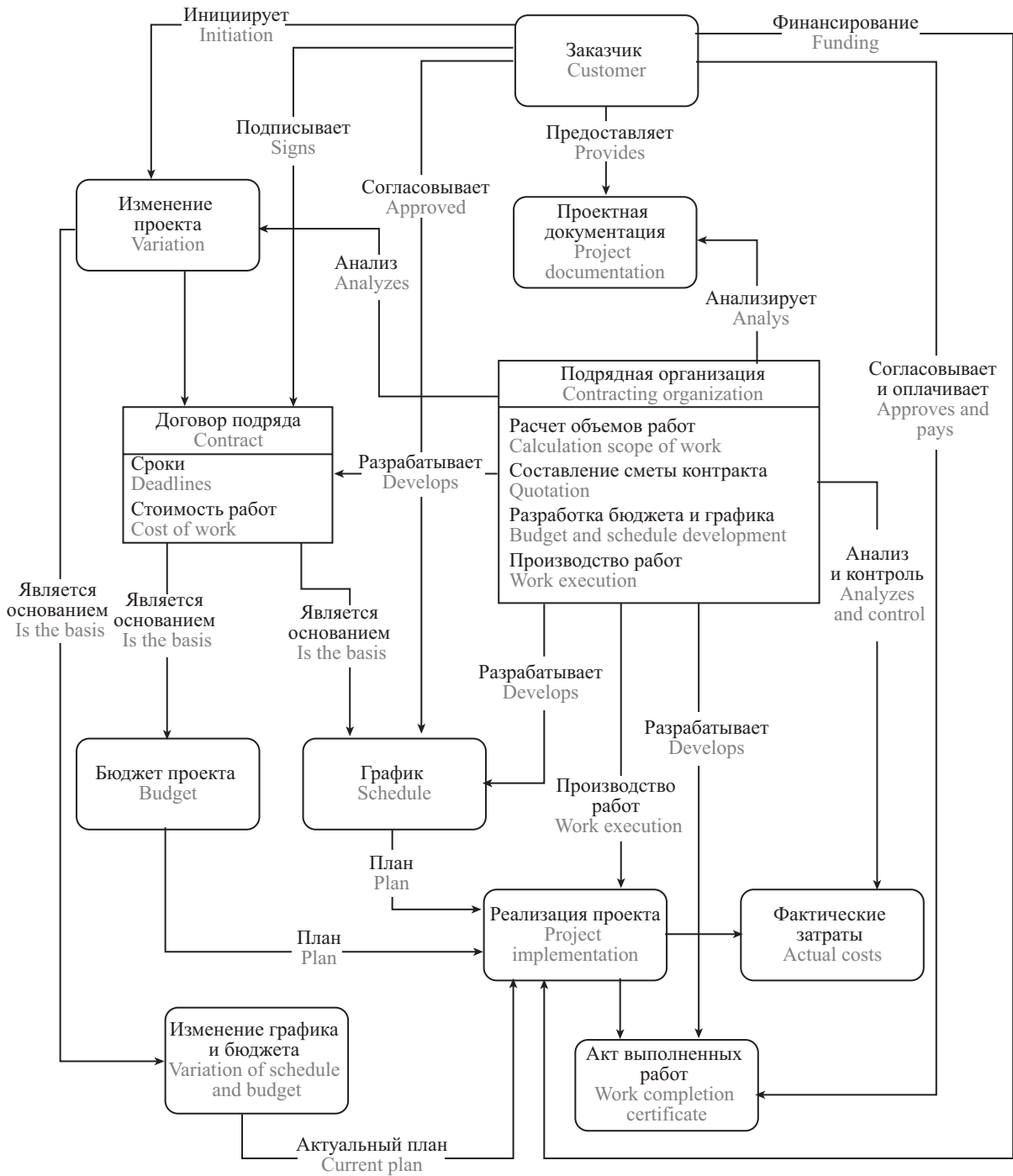


Рис. 1. Концептуально-семантическая модель
Fig. 1. Conceptual-semantic model

Таким образом, составление бюджета проекта в подрядной организации — один из ключевых элементов в реализации контроля стоимости проектов подрядными организациями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выполнен анализ отечественной и зарубежной литературы по теме бюджета строительного проекта, рассмотрены два подхода к определению бюджета проекта: традиционный и бережливый. Проведен сравнитель-

ный анализ, в результате которого выявлены отличия между расчетом стоимости реализации строительного проекта при разработке сметной документации и бюджета проекта. Приведены рекомендации по составлению бюджета проекта на основе результатов практической деятельности подрядных организаций.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сметная документация в строительстве содержит в том числе документы, на базе которых фор-

мируется стоимость отдельных видов/комплексов работ. К таким документам относятся локальные сметные расчеты и локальные сметы, составляемые соответственно при двухстадийном проектировании на стадии проекта и рабочей документации. В рамках данного исследования примем за основу для формирования бюджета проекта локальные сметные расчеты.

Одной из важных составляющих в процессе управления стоимостью проектов является составление бюджета проекта, включающего стоимость всех планируемых к использованию ресурсов, необходимых для реализации и достижения целей проекта.

Бюджетирование затрат проекта представляет собой процесс структуризации расходов: по видам работ, статьям затрат, по отчетным периодам, или по иной структуре [16, 17]. Одно из основных отличий бюджета от сметы проекта (табл. 2) заключается в наличии не только расходной, но и доходной части, а также распределении затрат по временным периодам.

Следовательно, локальный сметный расчет содержит информацию о количестве и ценах планируемых к использованию ресурсов, на основе которой определяется стоимость реализации проекта. Сметная стоимость строительных работ складывается из суммы прямых затрат, а также накладных расходов

Табл. 2. Сравнение основных структурных параметров сметного расчета и бюджета проекта

Table 2. Comparison of the main structural parameters of the estimate calculation and the project budget

Наименование параметра Parameter name	Информация, приводимая в The information provided in	
	сметной документации estimate documentation	бюджете проекта подрядной организации the project budget of the contractor
Перечень работ по реализации проекта List of works for the implementation of the project	Состав работ по реализации проекта Scope of work for project implementation	Разбивка по работам отсутствует, группировка по статьям затрат и центрам финансовой ответственности No breakdown by work, grouping by cost items and financial responsibility centers
Перечень материальных ресурсов (МР) List of material resources (MR)	Основные МР, при этом часть вспомогательных учтена в накладных расходах Main MR, auxiliary included in overhead costs	МР сгруппированы по статьям расходов на основные, вспомогательные, спецодежда и т.д. MR are grouped by cost items for main, auxiliary, overall, etc.
Количество МР Quantity of MR	Сведения о количестве используемых МР Information of MR quantity	Обычно такие сведения отсутствуют Usually such information is not available
Стоимость МР Cost of MR	Сведения о цене за единицу МР и общей стоимости на весь объем Information on the price per unit of MR and the total cost for the entire volume	Сведения о стоимости МР на запланированный объем Information on the cost of MR for the planned volume
Фонд оплаты труда (ФОТ) рабочих Workers' payroll (WB)	Информация о затратах на ФОТ рабочих, включая налоги и взносы Information on the costs of the workers' payroll, including taxes	ФОТ основных рабочих выделяется в отдельную статью прямых расходов, налоги и взносы указываются отдельно The payroll of workers is allocated as a separate item of direct expenses, taxes and contributions are indicated separately
Фонд оплаты труда инженерно-технических работников (ФОТ ИТР) Payroll of Engineering and Technical employees	ФОТ ИТР включен в раздел накладные расходы Payroll of engineering and technical employees is included in the overhead costs section	ФОТ ИТР объекта выделяется в отдельную статью прямых расходов, налоги и взносы указываются отдельно Payroll of engineering and technical employees is allocated as a separate item of direct expenses, taxes and contributions are indicated separately
Фонд оплаты труда механизаторов (ФОТм) Machine operators' wage fund (WB)	Сведения о затратах на ФОТм, включая налоги и взносы Information on payroll costs, including taxes and contributions	ФОТм включается в стоимость эксплуатации машин и механизмов Included in the cost of operating machines and mechanisms
Трудозатраты, чел.-ч Labor, man hours	Информация о нормативных трудозатратах рабочих и механизаторов Information on standard labor costs of workers and machine operators	Обычно детализация отсутствует Usually no detail

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Наименование параметра Parameter name	Информация, приводимая в The information provided in	
	сметной документации estimate documentation	бюджете проекта подрядной организации the project budget of the contractor
Взносы с ФОТ прямых расходов Contributions from the payroll of direct expenses	Включены в состав ФОТ рабочих Included in the payroll of workers	Выделяются в отдельную статью прямых расходов Allocated as a separate item of direct expenses
Стоимость эксплуатации машин и механизмов Cost of operating machines and mechanisms	Сведения о затратах на эксплуатацию машин и механизмов по каждому ресурсу при выполнении работ Information on the costs of operating machines and mechanisms for each resource when performing work	Данные о затратах на эксплуатацию машин и механизмов в разбивке на собственные, арендные и их перебазировку на стройплощадку с учетом НДС к возмещению (в отдельных случаях детализация по видам техники) Information on the costs of operating machinery and mechanisms, broken down into own, rented and their relocation to the construction site, taking into account VAT (in some cases, breakdown by type of equipment)
Стоимость транспортировки МР и перебазировки машин и механизмов Cost of transportation of MP and relocation of machines and mechanisms	Учтена в стоимости МР/машин и механизмов, в отдельных случаях учитывается дополнительно Included in the cost of MR/machines and mechanisms, in some cases taken into account additionally	Обычно отдельная статья прямых расходов Usually a separate line item of direct costs
Машиноёмкость, ч Machine, hours	Сведения о машиноёмкости Machine hours quantity	Обычно детализация отсутствует Usually no detail
Субподрядные работы Subcontract work	Формируется с учетом, что весь объем работ выполняется собственными силами Is formed taking into account that the entire scope of work is carried out on its own	В виде отдельной статьи прямых расходов с учетом НДС к возмещению As a separate item of direct expenses including VAT
Общепроизводственные расходы (ОПР) General production costs (GPC)	Учтены в составе накладных расходов Included in overhead costs	Сведения о затратах на ОПР в разбивке по статьям, обычно детализированы Information on GPC costs broken down by item, usually detailed
Административно-хозяйственные расходы (АХР) Administrative and business expenses (ABE)	Учтены в составе накладных расходов Included in overhead costs	Выделяются в отдельную статью и рассчитываются как % от суммы договора подряда (выручки) Are allocated as a separate item and calculated as a % of the contract amount (revenue)
Резерв на непредвиденные расходы Reserve for unforeseen expenses	Учитывается в сводном сметном расчете Taken into account in the consolidated estimate calculation	Обычно выделяется в отдельную статью Usually allocated to a separate item
Период строительства Construction period	Не учитывается при расчете сметной стоимости, устанавливается в соответствии с календарным графиком в составе проекта организации строительства Not taken into account when calculating the estimated cost; established in accordance with the schedule as part of the construction organization project	Учитывается для расчета расходов на ФОТ, эксплуатацию машин и механизмов, накладные расходы. Бюджет составляется в разбивке на периоды Taken into account for calculating expenses on payroll, operation of machines and mechanisms, overhead costs. The budget is broken down into periods
Налог на прибыль Income tax	Учитывается в составе нормативной величины сметной прибыли Is taken into account as part of the standard amount of estimated profit	Выделяется в отдельную статью Usually allocated to a separate item

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Наименование параметра Parameter name	Информация, приводимая в The information provided in	
	сметной документации estimate documentation	бюджете проекта подрядной организации the project budget of the contractor
НДС VAT	Учитывается отдельно Allocated to a separate item	Сумма рассчитывается как разница НДС к уплате и возмещению, выделяется в отдельную статью The amount is calculated as the difference between VAT payable and refundable, and is allocated as a separate item
Прибыль по проекту Project profit	Учитывается в составе нормативной величины сметной прибыли Is taken into account as part of the standard amount of estimated profit	Сумма рассчитывается как разница между выручкой и планируемыми затратами с учетом налогов, выделяется в отдельную статью The amount is calculated as the difference between revenue and planned costs, taking into account taxes, and is allocated as a separate item

и сметной прибыли, величина которых формируется на основе установленных сметных норм. В отличие от локального сметного расчета бюджет проекта основан на стоимостных показателях с детализацией по статьям управленческого учета конкретной подрядной организации, выстроенного на базе специфики выполняемых работ и с учетом налогового законодательства.

Цель бюджетирования — достижение наилучших результатов при реализации проекта, а также взаимоувязка планов с имеющимися ресурсами компании [18]. Бюджетирование, с одной стороны, представляет собой составление финансовых планов, а с другой — является управленческой технологией для принятия обоснованных решений.

Подрядная организация самостоятельно разрабатывает бюджетный регламент в виде внутрифирменных документов в зависимости от специфики выполняемых работ и необходимой детализации. Бюджеты подрядной организации в строительстве разрабатываются по принципу «снизу вверх» [19], поскольку их основой служат результаты работы на объектах строительства. Таким образом, на базе производственной программы на бюджетуемый период составляются другие бюджеты подрядной организации по методу начисления: общепроизводственных расходов подразделений; управленческих и коммерческих расходов организации; материальных затрат проектов и в целом организации.

Составление бюджета проекта в подрядных организациях имеет ряд особенностей [20], среди которых можно выделить учет не только предполагаемых затрат, но возможных изменений и рисков. Заказчик несет риск превышения затрат на реализацию проекта по сравнению со сметой контракта, в то время как подрядчики несут риск получения меньшей прибыли или ее отсутствия.

На этапе составления бюджета проекта в подрядной организации дается ответ на два вопроса [4]:

1. Какая у проекта может быть рентабельность?

2. Можем ли мы достичь плановой рентабельности при реализации этого проекта?

Ответ на первый вопрос предполагает принятие решения подрядной организации о том, какие ресурсы необходимы для реализации проекта и их допустимой стоимости, затем следует сравнить предполагаемые затраты и допустимую стоимость при заданной рентабельности. На второй вопрос можно ответить путем оценки вероятности возникновения рисков и возможности управления этими рисками.

Риски — это все те события, которые могут повлиять на реализацию проекта и тем самым вызвать отклонения от плана. При составлении бюджета проекта требуется учитывать вероятность возникновения рисков, влияющих на стоимость реализации проекта: «известные неизвестные» события, которые с большой вероятностью могут произойти и которые возможно предвидеть, «неизвестные неизвестные» события, которые предугадать невозможно [4].

Бюджет предполагает разделение ответственности за достижение запланированных показателей. Контроль исполнения бюджета проекта — одна из ключевых функций руководителя проекта в ходе выполнения работ над проектом. Цели проекта обычно выходят за рамки пары объем/стоимость и включают в себя время реализации, безопасность, воздействие на окружающую среду и многое другое.

Рассмотрим более детально базовый механизм трансформации локального сметного расчета в бюджет проекта подрядной организации. При подготовке бюджета проекта целевые затраты распределяются по статьям с необходимой детализацией, для каждой статьи устанавливается допустимая стоимость. Таким образом, создается модель затрат, которая позволяет запланировать требуемые финансовые и материальные ресурсы для реализации проекта с распределением по периодам.

Бюджет проекта состоит из двух частей: доходов и расходов на реализацию проекта. Отправной точкой для формирования бюджета проекта в под-

рядной организации является сумма договора подряда, обоснованием которой служит локальный сметный расчет, составленный с применением действующих сметных нормативов, или коммерческий расчет, а также плановые сроки реализации проекта, указанные в договоре подряда.

Сумма договора — это фиксированная предполагаемая выручка, затем определяется потребность в материалах с необходимой детализацией. Подрядная организация устанавливает перечень статей исходя из специфики производимых ею работ. Так, например, подрядная организация, занимающаяся строительством инженерных сетей, может разделять МР в зависимости от принадлежности к инженерным сетям по следующим группам: МР теплосети, МР водопроводной сети, МР водосток и т.д. А для подрядной организации, занимающейся производством монолитных работ, необходимо деление МР в зависимости от вида выполняемых работ на бетон, арматуру, опалубку и другое. Целесообразно МР подразделять на три ключевые группы:

- основные МР по проекту;
- вспомогательные МР, требуемые для производства работ, например электроды, проволока и другое;
- оборачиваемые МР: многоразового использования, например опалубка, леса и другое.

ФОТ по проекту определяется исходя из сроков и трудоемкости работ, как и стоимость работы машин и механизмов. Оплата услуг сторонних организаций также планируется на этапе составления бюджета. Общепроизводственные расходы намечаются с учетом условий на строительной площадке. Административно-хозяйственные расходы, как правило, принимаются в процентном соотношении к планируемой выручке, исходя из фактических расходов компании, определяются эмпирическим пу-

тем и обычно составляют от 5–20 %. Расчет налогов и сборов производится в соответствии с действующим законодательством. Сумма прибыли складывается из разницы планируемых затрат с учетом налогов и выручки, затем рассчитывается планируемая рентабельность проекта. В результате формируется цель проекта, заключающаяся в достижении планируемой рентабельности при соблюдении сроков и качества работ.

В практике подрядных организаций не все договоры имеют рентабельность, планируемая прибыль может быть отрицательной (убыток), несмотря на это такие проекты тоже реализуют. В этом случае контроль затрат имеет еще большее значение, так как подрядная организация максимально заинтересована в сокращении издержек и повышении эффективности, чтобы реализовать проект с меньшими потерями.

Сравнение структур локального сметного расчета и бюджета проекта на примере проекта строительства инженерных сетей приведено в табл. 3.

Локальный сметный расчет на выполнение работ по прокладке наружных тепловых сетей диаметром 159 мм и протяженностью 408 м при строительстве дошкольной образовательной организации (левая часть табл. 3), составленный с применением территориальных сметных нормативов для г. Москвы ТСН-2001, получил положительное заключение по результатам прохождения государственной экспертизы. В правой части табл. 3 приведена трансформация локального сметного расчета в бюджет проекта подрядной организации, выполняющей работы по реализации данного проекта при плановом сроке строительства 3,7 мес.

Контроль исполнения бюджета — одна из основных функций руководителя проекта в ходе работ над проектом. Фактические затраты распределяют-

Табл. 3. Сравнение структур локального сметного расчета и бюджета проекта на примере проекта строительства инженерных сетей

Table 3. Comparison of the structures of local cost estimates and project budgets using the example of a utility network construction project

Структура локального сметного расчета Structure of local cost estimate calculation	Сметная стоимость, руб. Estimated cost, rub	Структура бюджета проекта Project budget structure	Бюджетная стоимость, руб. Budget cost, rub	Фактическая стоимость, руб. Actual cost, rub
Сметная стоимость Estimated cost	22 831 755	Сумма договора подряда Contract amount	22 831 755	22 831 755
Затраты Expenses	—	Затраты Expenses	21 695 366	21 379 261
Материалы Materials	8 019 079	Материалы Materials	8 019 334	8 204 875
ФОТ Payroll	2 230 204	ФОТ Payroll	2 907 407	3 059 017
		Страховые взносы Contributions from the payroll of direct expenses	1 467 071	1 613 705

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Структура локального сметного расчета Structure of local cost estimate calculation	Сметная стоимость, руб. Estimated cost, rub	Структура бюджета проекта Project budget structure	Бюджетная стоимость, руб. Budget cost, rub	Фактическая стоимость, руб. Actual cost, rub
Стоимость работы машин и механизмов, в том числе ФОТМ Cost of operation of machines and mechanisms, including WM	4 508 563	Стоимость работы арендуемых машин и механизмов Cost of operation of rented machines and mechanisms	4 140 000	2 155 475
		Стоимость работы собственных машин и механизмов, в том числе ФОТМ Cost of operation of own machines and mechanisms including WM	259 457	1 717 244
—	—	Работы сторонних организаций Subcontract work cost	198 105	458 875
Накладные расходы Overheads	3 117 670	Накладные расходы проекта (ОПР) General production costs (GPC)	1 207 509	1 034 967
		АХР Administrative and business expenses (ABE)	1 598 223	1 011 249
Сметная прибыль Estimated profit	1 110 375	Налог на прибыль Income tax	279 698	363 124
		Чистая прибыль Net profit	1 048 400	1 452 494
НДС VAT	3 845 863	НДС VAT	1 636 160	1 760 730

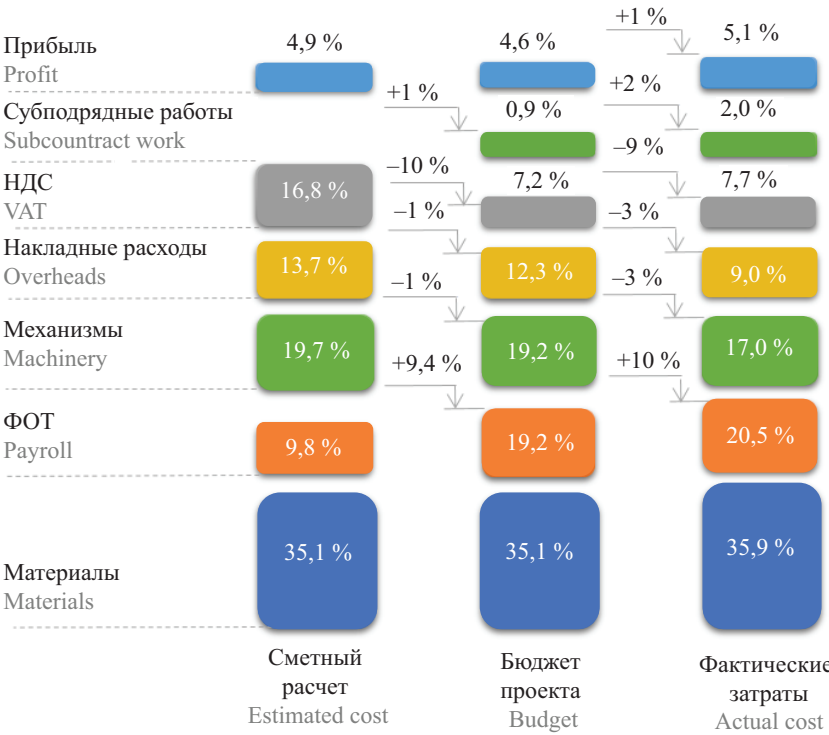


Рис. 2. Сравнение структуры локального сметного расчета, бюджета проекта и фактических данных

Fig. 2. Comparison of the structure of the local estimate calculation, the project budget and actual data

ся по статьям учета и с заданной периодичностью. Обычно ежемесячно формируется отчет для сравнения и анализа планируемых затрат по бюджету и фактических. Сравнение структуры затрат сметного расчета, бюджета проекта и фактических затрат представлено на рис. 2.

Фактические затраты на оплату труда рабочих (табл. 3) оказались в два раза выше, чем рассчитанные в локальном сметном расчете, и их доля на 10 % выше в стоимости (рис. 2). При этом накладные расходы и НДС фактически меньше расчетных, это объясняется тем, что подрядная организация оплачивает НДС по проекту как разницу между входящим НДС на выручку и исходящим на затраты, облагаемые НДС.

Для планирования и контроля затрат при реализации проекта подрядным организациям предлагается разрабатывать концептуальную модель, содержащую подробное описание последовательности процессов планирования и контроля затрат по проекту, используемые инструменты, предполагаемые результаты, а также описание порядка использования получаемых в процессе реализации проекта аналитических материалов, на основе которых впоследствии возможно принимать корректирующие действия.

Таким образом, для оптимизации затрат при реализации проектов силами подрядных организаций целесообразно моделировать процессы планирова-

ния и контроля стоимости проектов, используя современные подходы и методы, такие как бережливое строительство.

Применение методов бережливого строительства позволит сократить сроки реализации проекта за счет более эффективного и гибкого планирования, а также совершенствовать оценку сметной стоимости проекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен сравнительный анализ локального сметного расчета и бюджета проекта в подрядной организации, установлены отличия в структуре стоимости. Бюджет проекта в отличие от локального сметного расчета имеет структуру, коррелирующую со статьями управленческого учета, имеет доходную и расходную часть, а также распределен по периодам в зависимости от графика производства работ.

Бюджет проекта необходим для внутреннего контроля затрат на реализацию проекта в подрядной организации.

Выявлены отличия в структуре и соотношении затрат, формируемых в локальном сметном расчете, бюджете проекта и фактических затратах при реализации проекта.

Применение методов бережливого строительства при оценке и планировании реализации проекта даст возможность повысить эффективность и сократить издержки в подрядных организациях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Краснова Л.Н., Багманова А.Р. История становления и развития бережливого производства в России и зарубежом // Актуальные вопросы экономики, менеджмента и финансов в современных условиях : сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-практ. конф. 2016. С. 37–41. EDN VIWESV.

2. Ohno T. Toyota production system: beyond large-scale production. Productivity press, 2019. 176 p. DOI: 10.4324/9780429273018

3. Koskela L. Application of the new production philosophy to construction. Stanford : Stanford University, 1992. No. 72.

4. Tzortzopoulos P., Kagioglou M., Koskela L. Lean construction: core concepts and new frontiers. Routledge, 2020. DOI: 10.1201/9780429203732

5. Liu A., Ren X., Xu Y., Chen X. Study on Construction Project Cost Control Based on Lean Construction Thought // Proceedings of the International Conference on Education, Management and Information Technology. 2015. DOI: 10.2991/icemit-15.2015.55

6. Козлов Р.Н., Пешков А.В. Интеграция бережливого производства и BIM-технологий как основа эффективного проектного управления и организации производственных процессов на этапе стро-

ительства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2 (45). С. 271–284. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-2-271-284. EDN TTTKEJ.

7. Pazarceviren S.Y., Celayir D. Target costing based on the activity-based costing method and a model proposal // European Scientific Journal. 2013. Vol. 4. Issue 1. Pp. 1–21.

8. Королев Ю.Ю., Мышковец Ю.А. Особенности и преимущества использования метода Activity Based Costing (ABC) // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2018. № 55. С. 93–99. EDN XOYEQH.

9. Singh B., Garg S.K., Sharma S.K. Value stream mapping: literature review and implications for Indian industry // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011. Vol. 53. Issue 5–8. Pp. 799–809. DOI: 10.1007/s00170-010-2860-7

10. Лебедева А.Е., Каракозова И.В. Применение метода канбан для анализа потока проектов в крупной подрядной организации строительного сектора // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. № 2. С. 178–194. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.2.178-194. EDN FRPCKW.

11. Porwal V., Fernández-Solís J., Lavy S., Rybkowski Z.K. Last planner system implementation challenges // Proceedings of the 18 Annual Conference International Group for Lean Construction. 2010. Vol. 18. Pp. 548–556.

12. Ballard G. Should Project budgets be based on worth or cost // 20th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. 2012. Pp. 761–770.

13. Ballard G. P2SL report: Current benchmark in target costing. Project Production Systems Laboratory. Berkeley : University of California, 2005.

14. Андрианова Ю.В. Оценка эффективности инвестиционных проектов в современных условиях // Российский экономический интернет-журнал. 2019. № 1. С. 5. EDN JXOEAL.

15. Thiry M. Combining value and project management into an effective programme management model // International Journal of Project Management. 2002. Vol. 20. Issue 3. Pp. 221–227. DOI: 10.1016/S0263-7863(01)00072-2

16. Левашиова А.А. Понятие бюджет проекта и его стадии // Научно-исследовательский центр «Вектор развития». 2022. № 9. С. 674–677. EDN NEZRER.

17. Зверева Е.В., Игнатьева А.А. Управление стоимостью инвестиционно-строительного проекта // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. № 4–2 (79). С. 7–9. DOI: 10.24412/2500-1000-2023-4-2-7-9. EDN VQCCDT.

18. Азракова Е.В., Крюков А.Ф. Методика бюджетирования подрядных подразделений предприятия // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2009. № 5 (85). С. 193–201. EDN KZFHJD.

19. Новак Е.В. Бюджетирование в строительстве. От простого к сложному // Бухучет в строительных организациях. 2010. № 8. С. 21–25. EDN RSFYCN.

20. Порядин В.С. Специфика составления бюджета в строительных проектах // Вестник науки. 2023. Т. 3. № 8 (65). С. 134–136. EDN HPGEAK.

Поступила в редакцию 16 мая 2025 г.

Принята в доработанном виде 21 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 17 июня 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Александра Евгеньевна Лебедева** — аспирант кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3373-1543, ORCID: 0009-0007-0843-9703; uncea@yandex.ru;

Ирина Викторовна Каракозова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 655795, Scopus: 57190864252, ResearcherID: AAD-4118-2022, ORCID: 0000-0002-7913-919X; i.kar@inbox.ru;

Мирал Альшрайдех — преподаватель кафедры возобновляемой энергетики; **Университет Аль-аль-Байт**; 130040, г. Мафрак, 25113, Иордания; Miral@aabu.edu.jo.

Вклад авторов:

Лебедева А.Е. — концепция исследования, сбор и обработка материала, написание статьи.

Каракозова И.В. — доработка текста, итоговые выводы.

Мирал Альшрайдех — сбор и обработка материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Krasnova L.N., Bagmanova A.R. History of the formation and development of lean manufacturing in Russia and abroad. *Current issues of economics, management and finance in modern conditions : collection of scientific papers following the results of the international scientific and practical conference*. 2016; 37-41. EDN VIWESV. (rus.).

2. Ohno T. *Toyota production system: beyond large-scale production*. Productivity press, 2019; 176. DOI: 10.4324/9780429273018

3. Koskela L. *Application of the new production philosophy to construction*. Stanford, Stanford University, 1992; 72.

4. Tzortzopoulos P., Kagioglou M., Koskela L. *Lean construction: core concepts and new frontiers*. Routledge, 2020. DOI: 10.1201/9780429203732

5. Liu A., Ren X., Xu Y., Chen X. Study on Construction Project Cost Control Based on Lean Construction Thought. *Proceedings of the International Conference on Education, Management and Information Technology*. 2015. DOI: 10.2991/icemit-15.2015.55

6. Kozlov R.N., Peshkov A.V. Integration of lean management and bim technologies for effective project management and production processes at a construction stage. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023; 13(2):(45):271-284. DOI:

10.21285/2227-2917-2023-2-271-284. EDN TTTKEJ. (rus.).

7. Pazarceviren S.Y., Celayir D. Target costing based on the activity-based costing method and a model proposal. *European Scientific Journal*. 2013; 4(1):1-21.

8. Korolev Yu.Yu., Myshkovets Y.A. Features and benefits of using the activity based costing method. *Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport*. 2018; 55:93-99. EDN XOYEQH. (rus.).

9. Singh B., Garg S.K., Sharma S.K. Value stream mapping: literature review and implications for Indian industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011; 53(5-8):799-809. DOI: 10.1007/s00170-010-2860-7

10. Lebedeva A.E., Karakozova I.V. Application of the kanban method to the analysis of project flow in a large contracting organization of the construction sector. *Construction: Science and Education*. 2024; 14(2):178-194. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.2.178-194. EDN FRPCKW. (rus.).

11. Porwal V., Fernández-Solís J., Lavy S., Rybkowski Z.K. Last planner system implementation challenges. *Proceedings of the 18 Annual Conference International Group for Lean Construction*. 2010; 18:548-556.

12. Ballard G. Should Project budgets be based on worth or cost. *20th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. 2012; 761-770.

13. Ballard G. P2SL report: Current benchmark in target costing. *Project Production Systems Laboratory*. Berkeley, University of California, 2005.

14. Andrianova J.V. Evaluation of the effectiveness of investment projects in modern conditions. *Russian Economic Online Journal*. 2019; 1:5. EDN JXOEAL. (rus.).

15. Thiry M. Combining value and project management into an effective programme management model. *International Journal of Project Management*. 2002; 20(3):221-227. DOI: 10.1016/s0263-7863(01)00072-2

16. Levashova A.A. The concept of a project budget and its stages. *Research Center "Vector of Development"*. 2022; 9:674-677. EDN NEZRER. (rus.).

17. Zvereva E.V., Ignatieva A.A. Worth management investment and construction project. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2023; 4-2(79):7-9. DOI: 10.24412/2500-1000-2023-4-2-7-9. EDN VQCCDT. (rus.).

18. Azrakova E.V., Kryukov A.F. Methodology of budgeting of contracting divisions of the enterprise. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. 2009; 5(85):193-201. EDN KZFHJD. (rus.).

19. Novak E.V. Budgeting in construction. From simple to complex. *Accounting in Construction Organizations*. 2010; 8:21-25. EDN RSFYCN. (rus.).

20. Poryadin V.S. Specifics of budgeting in construction projects. *Science Bulletin*. 2023; 3(8):(65):134-136. EDN HPGEAK. (rus.).

Received May 16, 2025.

Adopted in revised form on May 21, 2025.

Approved for publication on June 17, 2025.

BIONOTES: **Aleksandra E. Lebedeva** — 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: 3373-1543, ORCID: 0009-0007-0843-9703; uncea@yandex.ru;

Irina V. Karakozova — Candidate of Technical 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: 655795, Scopus: 57190864252, ResearcherID: AAD-4118-2022, ORCID: 0000-0002-7913-919X; i.kar@inbox.ru;

Miral Al-Shraideh — lecturer in the Department of Renewable Energy; **Al al-Bayt University**; Mafrq, 130040, Jordan, 25113; Miral@aabu.edu.jo.

Contribution of the authors:

Aleksandra E. Lebedeva — concept of the study, collection and processing of material, writing the article.

Irina V. Karakozova — revision of the text, final conclusions.

Miral Al-Shraideh — collection and processing of material.

The authors declare no conflict of interest.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотечных депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в

тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия^{2...}

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. **См. рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Abstract (200–250 слов)**Introduction:** text, text, text.**Materials and methods:** text, text, text.**Results:** text, text, text.**Conclusions:** text, text, text.**Key words:** text, text, text.**Acknowledgements:** text, text, text.**Corresponding author:** Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке источников сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в

статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями **ГОСТа Р 7.0.5–2008**.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Вклад авторов: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемьева С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В.В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

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.

И з в е щ е н и е

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в

ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК

004525988

КБК

0000000000000000000130

ОКТМО

45365000

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа

6 880

руб.

00

коп.

услуги

руб.

коп.

Итого

руб.

коп.

«

»

20

г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Квитанция

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в

ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК

004525988

КБК

0000000000000000000130

ОКТМО

45365000

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа

6 880

руб.

00

коп.

услуги

руб.

коп.

Итого

руб.

коп.

«

»

20

г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

