

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 21. Выпуск 7
2026**

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

Сквозной номер 212

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 21. Issue 7
2026**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 24-76
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	31.07.2026.
Подписан в свет	18.09.2026.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 22,32. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 271	

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

Дмитрий Вячеславович Козлов, академик РААСН, профессор, доктор технических наук, руководитель Передовой инженерно-строительной школы, заведующий кафедрой гидравлики и гидротехнического строительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Надежда Сергеевна Никитина, доцент, кандидат технических наук, профессор кафедры механики грунтов и геотехники, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Виталий Александрович Гладких, доцент, кандидат технических наук, проректор, 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 Банахук, 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 Емиоло, д-р техн. наук, проф., зав. каф. сопротивления материалов, теории упругости и пластичности, Варшавский технологический университет, инженерно-строительный факультет, Республика Польша

Владимир Трофимович Ерофеев, академик РААСН, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

Олег Васильевич Кабанцев, доцент, доктор технических наук, директор научно-технических проектов, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Семен Суренович Каприелов, академик РААСН, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Армен Завенович Тер-Мартirosян, доктор технических наук, научный руководитель Научно-исследовательского института геотехники им. З.Г. Тер-Мартirosяна, профессор кафедры механики грунтов и геотехники, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Владимир Ильич Травуш, академик РААСН, профессор, доктор технических наук, советник при ректорате, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Марина Вячеславовна Шитикова, профессор, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой высшей математики, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Редакция журнала

Выпускающий редактор: Алла Русланбековна Табекова

Редактор: Татьяна Владимировна Бердникова

Перевод на английский язык: Ольга Валерьевна Юденкова

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Дизайн и верстка: Алина Юрьевна Байкова

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

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

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

Леонид Семенович Ляхович, д-р техн. наук, проф., акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. строительной механики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», Томск, Российская Федерация

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

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

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

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

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

Чунок Дмитрий Юрьевич, д-р техн. наук, доцент, НИУ МГСУ, Москва, 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:	18.09.2026

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

Dmitry V. Kozlov, 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

Vitaly A. Gladkikh, 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 Banaszk, Bialystok University of Technology, Poland

Alexander T. Bekker, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

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

Alexander M. Belostotsky, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

Vladimir T. Erofeev, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, 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

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

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

Semen S. Kaprielov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

Elena A. Korol, 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

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

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

Andrey B. Ponomarev, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, 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

Marina V. Shitikova, 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

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

Vladimir I. Travush, 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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

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

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

Dmitry Yu. Chunyuk, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Nataliya V. Fedorova, 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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

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

А.Е. Кубасевич
Вероятностные и нормативные подходы к оценке надежности изгибаемых стальных конструкций 1091

М.П. Кропоткин, И.К. Фоменко, А.А. Горлов
Практическое применение стохастических расчетов конечной осадки оснований плитных фундаментов 1101

А.М. Ибрагимов, Н.Ю. Трянина, В.В. Долгушева, Т.В. Долгушев
Сравнение напряженно-деформированного состояния комбинированной арочной конструкции при различных условиях опирания. 1114

П.С. Мильчевский, В.Е. Русанов
Методика определения параметров расчетной модели сталефибробетонных блоков по результатам испытаний 1125

О.В. Мкртычев, Т.А. Тагиров
Оценка сейсмостойкости железобетонных зданий повышенной этажности линейно-спектральным методом 1136

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Р.А. Майер, Н.Н. Шангина, А.М. Харитонов
Комплексная оценка систем материалов для штукатурной отделки фасадов кирпичных зданий 1148

Ф.А.А. Альваш, А.С. Иноземцев, Б.И. Булгаков, Ю.С. Филимонова
Оптимизация четырехкомпонентного вяжущего с золами аграрной и строительной промышленности Ирака 1158

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Д.Д. Худякова, О.Г. Примин, Г.Н. Громов
Совершенствование конструкций сооружений локальной очистки поверхностных сточных вод 1168

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.С. Ильиных, Е.В. Мигалатий
Очистка нефтесодержащих сточных вод с применением поверхностно-модифицированных ультрафильтрационных мембран. 1181

Р.Ш. Мансуров
Переходные процессы изменения температуры и скорости потока при ступенчатом количественном регулировании в системе «нагреватель – вентилятор – помещение» 1194

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Р.В. Мотылев, В.В. Сокольников
Инженерная часть детерминированной модели организационно-технологической надежности строительства объектов в условиях Арктического региона 1210

А.П. Храбров
Управление жизненным циклом многофункциональных объектов строительства на основе модели сквозных процессов 1229

Е.В. Быковская, Е.И. Дмитриева, В.В. Бирюков, А.А. Сергеев
Проблемы развития региональной логистической транспортной системы России в условиях санкций 1250

Требования к оформлению научной статьи 1261

CONTENTS

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

Anton E. Kubasevich
Probabilistic and normative approaches to reliability assessment of flexural steel structures 1091

Mikhail P. Kropotkin, Igor K. Fomenko, Andrey A. Gorlov
Practical application of stochastic calculations of the final precipitation of plate foundations 1101

Alexander M. Ibragimov, Nadezhda Yu. Tryanina, Vera V. Dolgusheva, Timofey V. Dolgushev
Comparison of the stress-strain state of a combined arch structure under different support conditions 1114

Pavel S. Milchevskiy, Vladimir E. Rusanov
Methodology for determining parameters of a computational model of steel fibre-reinforced concrete segments based on test results 1125

Oleg V. Mkrtychev, Timur A. Tagirov
Seismic resistance assessment of reinforced concrete high-rise buildings using the linear response spectrum method. 1136

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Roman A. Mayer, Nina N. Shangina, Alexey M. Kharitonov
Comprehensive assessment of material systems for plaster finishing of brick building facades 1148

Farah Alaa Abdulameer Alwash, Aleksandr S. Inozemtcev, Boris I. Bulgakov, Yuliya S. Filimonova
Optimization of a four-component binder using ash from Iraq’s agricultural and construction industries 1158

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Darya D. Khudyakova, Oleg G. Primin, Grigoriy N. Gromov
Improvement of structural designs of local surface wastewater treatment facilities 1168

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Alexander S. Ilyinykh, Evgeny V. Migalatiy
Treatment of oil-containing wastewater using surface-modified ultrafiltration membranes 1181

Rustam Sh. Mansurov
Transient processes of temperature and flow velocity changes with stepwise quantitative control in the “heater – fan – room system” 1194

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Roman V. Motylev, Vladimir V. Sokolnikov
Engineering aspect of a deterministic model of organizational and technological reliability in the construction of facilities in the Arctic region 1210

Anton P. Khrabrov
Life cycle management of multifunctional construction projects based on an end-to-end process model 1229

Elena V. Bykovskaya, Ekaterina I. Dmitrieva, Valerij V. Biryukov, Aleksandr A. Sergeev
Challenges in the development of Russia’s regional transport and logistics system under sanctions 1250

Requirements for research paper design 1261

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).

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

объявляет о возможности подготовки диссертации на соискание ученой степени доктора наук
по теме: «Методология восстановительного ремонта объектов строительства после взрывных нагрузок при допустимом
уровне и техногенном загрязнении» по научной специальности 2.1.7 «Технология и организация строительства».

Конкурсный отбор состоится на заседании Президиума Научно-технического совета НИУ МГСУ 15.09.2026 в 14:00.

С порядком проведения конкурсного отбора можно ознакомиться на официальном сайте НИУ МГСУ (mgsu.ru).

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.014

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1091-1100

Вероятностные и нормативные подходы к оценке надежности изгибаемых стальных конструкций

Антон Евгеньевич Кубасевич

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Метод предельных состояний является основным инструментом в отечественной и зарубежной практике проектирования, однако его «полувероятностная» природа не позволяет явно учитывать распределения случайных величин. В то же время использование вероятностных методов, таких как First-Order Reliability Method (FORM), обеспечивает более объективную оценку безопасности. Особое внимание уделено отсутствию в отечественной нормативной базе четкой количественной характеристики целевого уровня индекса надежности β , что затрудняет оценку безопасности принятых проектных решений.

Материалы и методы. Исследование выполнено на примере расчета стальной балки, работающей в составе перекрытия офисного здания. Для анализа использованы два современных метода: метод предельных состояний (уровень I) и вероятностный метод надежности первого порядка FORM (уровень II). Исходные данные включали геометрические характеристики балки, плотности материалов и статистические свойства нагрузок.

Результаты. Расчеты по методу предельных состояний показали выполнение условий прочности при коэффициенте использования, близком к единице. Применение FORM позволило определить статистические параметры предельной функции, вероятность отказа и безотказной работы и соответствующий им индекс надежности $\beta = 2,332$. Сравнение с расчетами по европейским нормам выявило более высокие требования: при учете статистических характеристик нагрузок по JCSS требуемый момент сопротивления увеличивается на 27 %, а индекс надежности достигает значения $\beta \approx 2,943$. Ни один из подходов не обеспечил нормативный уровень $\beta = 3,8$, установленный EN 1990 для конструкций класса RC2.

Выводы. Выявлена существенная расхожимость оценок надежности при расчетах детерминистическим методом предельных состояний по российским и европейским нормам, также отмечены причины расхождений (модели распределений, параметры нагрузок и коэффициенты норм). Отмечена необходимость совершенствования национальных подходов к обеспечению надежности. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются уточнение моделей распределения прочностных характеристик и нагрузок, а также разработка упрощенных инженерных методик применения вероятностных методов в проектировании.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод предельных состояний, метод надежности первого порядка, вероятностное проектирование, надежность, вероятность отказа, индекс надежности, случайные величины нагрузок, изгиб, балка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кубасевич А.Е. Вероятностные и нормативные подходы к оценке надежности изгибаемых стальных конструкций // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 7. С. 1091–1100. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1091-1100

Автор, ответственный за переписку: Антон Евгеньевич Кубасевич, anton_kubasevich@mail.ru.

Probabilistic and normative approaches to reliability assessment of flexural steel structures

Anton E. Kubasevich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The limit state method is the primary tool in both domestic and international design practice; however, its “semi-probabilistic” nature does not allow for an explicit consideration of the distributions of random variables. At the same time, the use of probabilistic methods, such as the First-Order Reliability Method (FORM), provides a more objective assessment of safety. Particular attention is drawn to the lack of a clear quantitative specification of the target reliability index β in Russian design codes, which complicates the evaluation of the safety of adopted design solutions.

Materials and methods. The study was carried out on the example of a steel beam operating as part of an office building floor system. Two modern approaches were applied for the analysis: the limit state method (Level I) and the First-Order Reliability Method (FORM, Level II). The input data included the beam's geometric characteristics, material densities, and the statistical properties of loads.

Results. Calculations based on the limit state method confirmed compliance with strength requirements, with a utilization factor close to unity. The application of FORM made it possible to determine the statistical parameters of the limit-state function, the probability of failure and survival, and the corresponding reliability index, $\beta = 2.332$. Comparison with calculations according to European standards revealed stricter requirements: when considering the statistical properties of loads according to JCSS, the required section modulus increases by 27 %, and the reliability index reaches $\beta \approx 2.943$. Neither approach achieved the normative level of $\beta = 3.8$ specified in EN 1990 for RC2 class structures.

Conclusions. A significant divergence in reliability assessments was identified when comparing deterministic limit state calculations under Russian and European standards. The reasons for these differences (distribution models, load parameters, and code factors) were highlighted. The study emphasizes the need to improve national approaches to structural reliability. Promising directions for further research include refining distribution models for strength and load characteristics, as well as developing simplified engineering methodologies for the application of probabilistic methods in design practice.

KEYWORDS: limit state method, first-order reliability method, probabilistic design, reliability, probability of failure, reliability index, random load variables, bending, beam

FOR CITATION: Kubasevich A.E. Probabilistic and normative approaches to reliability assessment of flexural steel structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(7):1091-1100. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1091-1100 (rus.).

Corresponding author: Anton E. Kubasevich, anton_kubasevich@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Основной документ, регламентирующий надежность строительных конструкций в Российской Федерации, — ГОСТ 27751. Согласно ему расчетный (базовый) срок эксплуатации конструкций зданий нормального уровня ответственности должен составлять не менее 50 лет. В то же время в отечественной нормативной базе отсутствует четкая количественная характеристика целевого уровня надежности, соответствующего этому сроку и выраженного через вероятность отказа или индекс надежности (reliability index) β (характеристика безопасности [1]). Таким образом, инженеры, выполняющие расчет несущих конструкций, фактически не имеют полного представления о том, какой уровень безопасности закладывается в проектируемое сооружение. На данную проблему указывал, в частности, В.Д. Райзер [2, 3].

Метод предельных состояний (МПС) служит ключевым инструментом проектирования в России, Европе и США. При этом он относится к так называемым «полувероятностным» методам: расчетные значения воздействий и сопротивлений вводятся через коэффициенты надежности, полученные статистическим и эмпирическим путем, без явного описания распределений случайных величин. Такой подход удобен для практического проектирования, но не позволяет в полной мере учесть влияние вариации исходных параметров. В связи с этим в международной практике все шире применяются вероятностные методы расчета, в частности First-Order Reliability Method (FORM) [4–6], обеспечивающий более объективную количественную оценку надежности конструкций. Оценкой надежности строительных конструкций вероятностными методами занимались российские [7–9] и зарубежные исследователи [10–12].

Российскими исследователями предпринимались неоднократные попытки оценки значений индекса на-

дежности проектируемых конструкций. В труде [13] показано, что индекс надежности для стальных конструкций находится в диапазоне $\beta = 2,3–2,7$. В другом исследовании [14] принято целевое значение $\beta = 2,7$. В фундаментальной работе А.Р. Ржаницына [1] приведены сведения о работе комиссии, разрабатывавшей первые редакции норм по методу предельных состояний. Отмечается, что при определении расчетных значений воздействий и сопротивлений в качестве инженерного упрощения часто использовалось нормальное распределение (распределение Гаусса):

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где σ — среднеквадратическое отклонение; μ — математическое ожидание.

Если обратиться к «правилу трех сигм», то вероятность того, что случайная величина примет значение в пределах $\pm 3\sigma$, составит:

$$P(|X - \mu| < 3\sigma) \approx 0,9973 \text{ (99,73 \%)}.$$

Это означает, что вероятность выхода случайной величины за границы $\pm 3\sigma$ не превышает 0,27 %, т.е. является практически несущественной. Для односторонней оценки (правая или левая сторона распределения) соответствующее значение индекса надежности $\beta \approx 2,77$.

Аналогично, для интервала $\pm 2\sigma$ вероятность будет:

$$P(|X - \mu| < 2\sigma) \approx 0,9545 \text{ (95,45 \%)}.$$

В одностороннем случае это соответствует $\beta \approx 1,645$. Эта величина хорошо согласуется с обеспеченностью нормативных прочностных характеристик материалов по ГОСТ 27751, которая должна быть не ниже 0,95.

Таким образом, можно предположить, что при применении нормального приближения и «правила

трех сигм» разработчики первых отечественных норм могли ориентироваться на целевой индекс надежности по первому предельному состоянию (ПС) в районе $\beta \approx 2,77-3$, а по второму ПС — порядка $\beta \approx 1,645-2$.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей статье на примере расчета стальной балки в составе перекрытия офисного здания определяются фактический индекс надежности и вероятность отказа, соответствующие коэффициенту использования, равному максимальному по методу предельных состояний.

Расчеты выполнялись двумя методами:

- методом предельных состояний на основе частных коэффициентов безопасности (уровень 1, «полувероятностный» метод);
- вероятностным методом надежности первого порядка (First-Order Reliability Method, FORM, уровень 2).

Поскольку в российской нормативной базе отсутствуют детальные указания по вероятностным методам расчета несущей способности конструкций, в работе главным образом использовались зарубежные нормативные документы (EN 1990: Eurocode — Basis of structural design) и справочные материалы (JCSS Probabilistic Model Code).

Исходные данные для расчета:

- 1) уровень ответственности здания — нормальный;
- 2) пролет балок перекрытия — 6 м, шаг — 2 м;
- 3) состав конструкции пола:
 - керамогранитная плитка на клеевом растворе, $\gamma = 2400 \text{ кг/м}^3$, $t = 20 \text{ мм}$;
 - цементно-песчаная стяжка, $\gamma = 1800 \text{ кг/м}^3$, $t = 70 \text{ мм}$;
 - железобетонная плита, $\gamma = 2500 \text{ кг/м}^3$, $t = 150 \text{ мм}$;
- 4) назначение помещений — офисы;
- 5) стальные балки перекрытия связаны с железобетонным настилом посредством сварных анкеров (арматурных выпусков).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет стальной балки по методу предельных состояний (Limit State Design, Load and Resistance Factor Design)

Метод предельных состояний развивался в разных научных школах (в том числе в СССР под руководством Н.С. Стрелецкого) и в настоящее время является базовым подходом в проектировании в России, Европе, США и ряде других стран [15]. При проектировании по МПС расчетные значения сопротивлений и эффектов воздействий устанавливаются на основании системы коэффициентов надежности и коэффициентов сочетаний. Их значения получены на базе многолетнего опыта проектирования зданий и сооружений и регламентированы национальными нормативными документами.

В общем случае условие предельного состояния для металлических конструкций по 1-му предельному состоянию может быть выражено в виде:

$$\gamma_n \sum_{i=1}^k \alpha_i F_{ni} \gamma_{fi} \psi_c \leq \eta \Phi R_n \gamma_c / \gamma_m,$$

где γ_n — коэффициент надежности по ответственности (ГОСТ 27751); α_i — коэффициент перехода от нормативной нагрузки к усилию; F_{ni} — нормативная нагрузка; γ_{fi} — коэффициент надежности по нагрузке; ψ_c — коэффициент сочетаний нагрузок; η — коэффициент, учитывающий характер действия/вид усилия и особенности расчетного предельного состояния (ϕ ; ϕ_c ; ϕ_b ; c и т.д.); Φ — расчетная характеристика сечения (A ; W и др.); R_n — нормативное сопротивление материала; γ_c — коэффициент условий работы; γ_m — коэффициент надежности по материалу.

Определение нагрузок и внутренних усилий

Подсчет интенсивности нагрузок при заданном пироге пола приведен в табл. 1, коэффициент надежности по ответственности принят $\gamma_n = 1$.

Для балки перекрытия принято сечение в виде двутавра 25Б2 (сталь С255Б) по ГОСТ 57837–2017 со следующими характеристиками:

- пластический момент сопротивления $W_{pl} = 319,36 \text{ см}^3$;
- номинальная масса 1 м балки $q_b = 25,7 \text{ кг/м} = 0,252 \text{ кН/м}$.

По данным табл. 1 при ширине грузовой площади $a = 2 \text{ м}$ линейная равномерно распределенная нагрузка на балку для расчетов по 1-му предельному состоянию:

$$q = g_p \cdot a + g_{st} \cdot a + q_b \cdot \gamma_f = 6,22 \cdot 2 + 2,40 \cdot 2 + 0,252 \cdot 1,05 = 17,5 \text{ кН/м}.$$

Расчетная схема балки показана на рисунке.

Максимальный изгибающий момент (середина пролета):

$$M_{\max} = q \cdot l^2 / 8 = 17,5 \cdot 6^2 / 8 = 78,76 \text{ кНм}.$$

Максимальная поперечная сила (на опоре):

$$Q_{\max} = q \cdot l / 2 = 17,5 \cdot 6 / 2 = 52,50 \text{ кНм}.$$

Проверка прочности

Для изгибаемых элементов, как правило, определяющей является проверка прочности по нормальным напряжениям, по которой, согласно EN 1993-1-1 (аналогично СП 16.13330), расчетное значение изгибающего момента M_{Ed} в каждом поперечном сечении изгибаемого стержня должно удовлетворять неравенству:

$$\begin{aligned} M_{Ed} / M_{c,Rd} &\leq 1; \\ M_{Ed} = M_{\max} &= 78,76 \text{ кНм}. \end{aligned}$$

Для поперечных сечений классов 1 или 2 по EN 1993-1-1 (3 и 2 СП 16.13330) расчетное значение несущей способности на изгиб определяется по формуле:

$$\begin{aligned} M_{c,Rd} &= W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 319,36 \cdot 25,5 / 1,025 = \\ &= 7945 \text{ кНсм} = 79,45 \text{ кНм}, \end{aligned}$$

Табл. 1. Подсчет интенсивности нагрузок на балку перекрытия

Table 1. Calculation of Load Intensities on the Floor Beam

Вид нагрузок Type of Load	Нормативная нагрузка g_n , кН/м ² Nominal Load g_n , kN/m ²	$\gamma_n \gamma_f$	Расчетная нагрузка g , кН/м ² Design Load g , kN/m ²
Постоянные нагрузки Permanent Loads			
Керамогранитная плитка на клеевом растворе, $\gamma = 2400 \text{ кг/м}^3$, $t = 20 \text{ мм}$ Ceramic granite tile on adhesive mortar, $\gamma = 2,400 \text{ kg/m}^3$, $t = 20 \text{ mm}$	0,47	1,2	0,57
Цементно-песчаная стяжка, $\gamma = 1800 \text{ кг/м}^3$, $t = 70 \text{ мм}$ Cement-sand screed, $\gamma = 1,800 \text{ kg/m}^3$, $t = 70 \text{ mm}$	1,24	1,3	1,60
Железобетонная плита, $\gamma = 2500 \text{ кг/м}^3$, $t = 150 \text{ мм}$ Reinforced concrete slab, $\gamma = 2,500 \text{ kg/m}^3$, $t = 150 \text{ mm}$	3,68	1,1	4,05
Итого постоянной нагрузки Total Permanent Load	5,39	—	6,22
Кратковременные нагрузки Short-Term Loads			
Офисные помещения (пп. 8.2.1, табл. 8.3, п. 2 СП 20) Office spaces (Clause 8.2.1, Table 8.3, Item 2, SP 20)	2,00	1,2	2,40
Итого кратковременной нагрузки Total Short-Term Load	2,00	—	2,40

где с учетом национального приложения к EN 1993-1-1:

- $f_y = R_{yn} = 255 \text{ Н/мм}^2 = 25,5 \text{ кН/см}^2$;
- $\gamma_{MO} = \gamma_m / \gamma_c = 1,025 / 1 = 1,025$.

Тогда неравенство приобретает вид:

$M_{Ed} / M_{c,Rd} = 78,76 / 79,45 = 0,991 < 1,$

следовательно, условие прочности балки выполняется.

Общую устойчивость балок перекрытия при условии наличия специальных конструктивных элементов, связывающих ее с настилом, можно считать обеспеченной. Другие проверки (прочность по касательным напряжениям, местная устойчивость сжатой полки и стенки, деформативность) показывают значительно больший запас прочности. Таким образом,

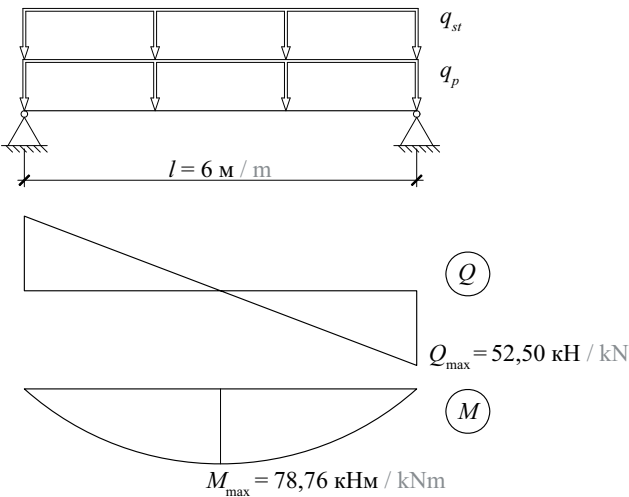
по результатам расчета методом предельных состояний условия прочности выполняются с максимальным коэффициентом использования $K_{исп}^{max} = 0,991$.

Расчет стальной балки по вероятностному методу надежности первого порядка (First-Order Reliability Method)

Метод надежности первого порядка (FORM) служит основой расчетов в EN 1990 и предполагает использование вероятностных моделей для оценки безопасности конструкций. Условия предельного состояния задаются через функцию g :

$g = R - E,$

где R — сопротивление конструкции; E — эффект воздействий.



Расчетная схема балки и эпюры внутренних усилий

Design scheme of the beam and diagrams of internal forces

Конструкция считается работоспособной при $g > 0$ и разрушающейся, если $g < 0$.

В методах уровня II мерой надежности считается вероятность безотказной работы:

$$P_s = 1 - P_f(g < 0),$$

где $P_f(g < 0) = P_f(R < E)$ — вероятность отказа за рассматриваемый расчетный период.

Принятые допущения:

1. Геометрические параметры балки считаются детерминированными:

- шаг балок $a^* = 2$ м;
- длина балки $l^* = 6$ м;
- площадь поперечного сечения $A^* = 32,68$ см²;
- пластический момент сопротивления поперечного сечения балки по длине $W_{pl}^* = 319,36$ см³.

Для расчета методом FORM в соответствии с JCSS необходимо учитывать вариации этих величин, включая допуски на прокат, изготовление и монтаж, а также их возможную корреляцию.

2. Законы распределения случайных величин:

- для описания расчетных сопротивлений и неопределенностей моделей применяется логнормальное распределение;
- постоянные нагрузки — нормальное распределение (Гаусса);
- 50-летний максимум полезной нагрузки — обобщенное распределение экстремальных значений (Гумбеля);
- все базовые переменные предполагаются независимыми.

Функция предельного состояния $g = R - E$ в виде условия прочности по нормальным напряжениям принимает вид:

$$g = \theta_R W_{pl}^* f_y - \theta_E M_{\max},$$

или раскрывая выражение для изгибающего момента:

$$g = \theta_R W_{pl}^* f_y - \theta_E [a^*(g_1 + g_2 + g_3 + g_{st}) + q_b] l^2 / 8,$$

что с учетом конструктивных параметров перекрытия можно записать как:

$$g = \theta_R W_{pl}^* f_y - \theta_E [a^*(\gamma_1 t_1 + \gamma_2 t_2 + \gamma_3 t_3 + g_{st}) + \gamma_{st} A^*] l^2 / 8,$$

где W_{pl}^* , a^* , A^* , l^2 — детерминированные величины (см. выше); g_1 , g_2 , g_3 — интенсивности постоянных нагрузок от веса слоев пирога перекрытия; q_b — собственный вес балки; θ_R , f_y , θ_E , γ_1 , t_1 , γ_2 , t_2 , γ_3 , t_3 , g_{st} и γ_{st} — базовые переменные вероятностной модели (см. далее).

Определение статистических параметров сопротивления

Номинальный предел текучести стали класса С255Б по EN 1993 $f_{ynom} = 255$ МПа. Согласно ГОСТ 27772 при отсутствии статистических данных среднеквадратичное отклонение для предела текучести принимается равным $\sigma(f_y) = 28$ Н/мм². Среднее

значение при нормальном распределении и 95%-ном процентиле определяется как:

$$E(f_y) = \mu(f_y) = f_{ynom} + 1,645\sigma(f_y) = 255 + 1,645 \cdot 28 = 301,1 \text{ МПа.}$$

По результатам испытаний российских [16, 17] и зарубежных исследователей [18–20] выявлено, что разброс сопротивления стали целесообразно описывать логнормальным распределением, что соответствует рекомендациям EN 1990. Тогда основные параметры f_y будут:

$$E(f_y) = 301,1 \text{ МПа;}$$

$$V(f_y) = 0,07; SD(f_y) = 21,1 \text{ МПа,}$$

где $V(f_y)$ и $SD(f_y)$ — коэффициент вариации и стандартное отклонение предела текучести стали при логнормальном распределении, принятые по стандарту JCSS.

Неопределенности модели сопротивления описываются параметрами:

$$E(\theta_R) = 1; V(\theta_R) = 0,05; SD(\theta_R) = 0,05.$$

Переменные f_y и θ_R подчиняются логнормальному распределению, их произведение также логнормально. С учетом неопределенностей модели получаем:

$$E(\theta_R f_y) = 301,1 \text{ Н/мм}^2; V(\theta_R f_y) = 0,086; SD(\theta_R f_y) = 25,92 \text{ Н/мм}^2.$$

Итоговые статистические параметры сопротивления с учетом момента сопротивления сечения:

$$E(R) = W_{pl}^* \cdot E(\theta_R f_y) = 319,6 \cdot 301,1 = 9622 \text{ кНсм} = 96,22 \text{ кНм;}$$

$$SD(R) = W_{pl}^* \cdot SD(\theta_R f_y) = 319,6 \cdot 25,92 = 828 \text{ кНсм} = 8,28 \text{ кНм;}$$

$$V(R) = 0,086; \omega(R) = 3V(R) + V(R)^3 = 3 \cdot 0,086 + 0,086^3 = 0,259.$$

Определение статистических параметров эффекта нагрузки

Переменные, характеризующие собственный вес и толщины слоев постоянной нагрузки, как правило, соответствуют нормальному распределению. На основе опыта эксплуатации и справочных данных задаются коэффициенты вариации, после чего обратным методом устанавливаются математические ожидания и стандартные отклонения. Средние значения и коэффициенты вариации для постоянных нагрузок приведены в табл. 2. При получении более точных сведений по плотности материалов и коэффициентам вариации значения могут быть уточнены.

Суммарная постоянная нагрузка с учетом грузовой площади балки определяется как:

$$E(q_p) = a^* E(\gamma_1 t_1) + a^* E(\gamma_2 t_2) + a^* E(\gamma_3 t_3) + A^* E(\gamma_{st}) = 2 \cdot 0,45 + 2 \cdot 1,12 + 2 \cdot 3,53 + 0,003268 \cdot 77 = 10,44 \text{ кН/м;}$$

Табл. 2. Средние значения и коэффициенты вариации вероятностной модели постоянных нагрузок
Table 2. Mean Values and Coefficients of Variation for the Probabilistic Model of Permanent Loads

Базовая переменная Basic Variable	Математическое ожидаение E Expected Value E	Коэффициент вариации V Coefficient of Variation V	Стандартное отклонение SD Standard Deviation SD	Единица измерения Unit
Плотность керамогранитной плитки γ_1 Density of ceramic granite tile γ_1	22,5	0,04	0,90	кН/м ³ kN/m ³
Толщина слоя керамогранитной плитки t_1 Thickness of ceramic granite tile layer t_1	20	0,02	0,4	мм mm
Плотность цементно-песчаной стяжки γ_2 Density of cement-sand screed γ_2	16	0,07	1,12	кН/м ³ kN/m ³
Толщина слоя цементно-песчаной стяжки t_2 Thickness of cement-sand screed layer t_2	70	0,07	0,49	мм mm
Плотность железобетонной плиты γ_3 Density of reinforced concrete slab γ_3	23,5	0,04	0,94	кН/м ³ kN/m ³
Толщина слоя железобетонной плиты t_3 Thickness of reinforced concrete slab t_3	150	0,03	4,5	мм mm
Плотность стали балки γ_{st} Density of steel beam γ_{st}	77	0,01	0,77	кН/м ³ kN/m ³

$$D(q_p) = a^2 D(\gamma_1 t_1) + a^2 D(\gamma_2 t_2) + a^2 D(\gamma_3 t_3) +$$
$$+ A^2 D(\gamma_{st}) = 2^2 \cdot 0,00041 + 2^2 \cdot 0,01232 +$$
$$+ 2^2 \cdot 0,03108 + 0,003268^2 \cdot 0,05929 = 0,1764;$$

$$SD(q_p) = \sqrt{D} = 0,42 \text{ кН/м};$$
$$V(q_p) = 0,04; \omega = 0.$$

В инженерном приближении для 50-летних максимумов кратковременной полезной нагрузки использовано распределение Гумбеля (тип I) с параметрами:

$$E(g_{st}) = 0,6 Q_k; V(g_{st}) = 0,35,$$

где $Q_k = 2 \text{ кН/м}^2$ — базовая (нормативная) величина нагрузки от офисных помещений Q_k .

При этом отметим, что указанные параметры приложенной нагрузки следует рассматривать только в качестве первого приближения. Более точные данные должны быть определены с учетом конкретных конструктивных условий (включая площадь загрузки и фактор влияния концентрации нагрузки на конкретную конструкцию). Таким образом получаем статистические параметры полезной нагрузки:

$$E(g_{st}) = 1,20 \text{ кН/м}^2; SD(g_{st}) = 0,42 \text{ кН/м}^2;$$
$$V(g_{st}) = 0,35; \omega(g_{st}) = 1,14.$$

С учетом площади нагрузки получаем:

$$E(q_{st}) = 2,4 \text{ кН/м}; SD(q_{st}) = 0,84 \text{ кН/м};$$
$$V(q_{st}) = 0,35; \omega(q_{st}) = 1,14.$$

Переменная q_{st} не подчиняется нормальному закону, функция E также не является нормальной. Для точного решения можно применить численное интегрирование [21] или преобразовать переменную q_{st} к нормальному виду, учитывая возможную погрешность такого приближения. В инженерном приближении, используя моменты случайных величин и основные параметры исходных переменных (матема-

тическое ожидание E , стандартное отклонение $SD = D^{0.5}$ и коэффициент асимметрии ω), можно достаточно точно определить статистические параметры суммарной равномерно распределенной нагрузки:

$$E(q_p + q_{st}) = 12,84 \text{ кН/м}; SD(q_p + q_{st}) = 0,94 \text{ кН/м};$$
$$V(q_p + q_{st}) = 0,073; \omega(q_p + q_{st}) = 0,817.$$

Неопределенности модели нагрузок задаются параметрами:

$$E(\theta_E) = 1; SD(\theta_E) = 0,2; V(\theta_E) = 0,2;$$
$$\omega(\theta_E) = 3 V(\theta_E) + V(\theta_E)^3 = 3 \cdot 0,2 + 0,2^3 = 0,608.$$

Параметры нагрузки с учетом неопределенности модели:

$$E(\theta_E q) = 12,84 \text{ кН/м}; SD(\theta_E q) =$$
$$= 2,74 \text{ кН/м}; V(\theta_E q) = 0,213; \omega(\theta_E q) = 0,677.$$

Наконец, с учетом длины балки получаем статистические параметры эффекта нагрузки:

$$E(E) = 57,79 \text{ кНм}; SD(E) = 12,33 \text{ кНм};$$
$$V(E) = 0,213; \omega(E) = 0,677.$$

Определение вероятности безотказной работы и индекса надежности

Переменные E и R не являются нормальными, следовательно, предельная функция $g = R - E$ также не подчиняется нормальному распределению. В общем случае для расчета вероятности отказа можно использовать численное интегрирование или метод Монте-Карло [22]. Аналогично определению параметров эффектов воздействий воспользуемся приближенным методом и, используя моменты и параметры случайных величин E и R , определим статистические параметры предельной функции:

$$E(g) = E(R) - E(E) = 96,22 - 57,79 = 38,43;$$
$$D(g) = SD(R)^2 + SD(E)^2 = 220,82;$$

$$SD(g) = \sqrt{D(g)} = 14,86;$$

$$V(g) = SD(g)/E(g) = 0,387.$$

Коэффициент асимметрии при независимых компонентах вычисляется по формуле:

$$\omega(g) = \frac{SD(R)^3 \omega(R) - SD(E)^3 \omega(E)}{[SD(R)^2 + SD(E)^2]^{3/2}}.$$

После подстановки получаем $\omega(g) = -0,342$.

Для инженерной аппроксимации формы распределения g можно использовать сдвинутое/отраженное логнормальное приближение; параметры этой аппроксимации (смещение X_0 , математическое ожидание μ и стандартное отклонение σ) подбираются по соответствию первым трем моментам функции g . В данном расчете были подобраны следующие параметры:

$$X_0 = 169,2 \text{ кНм}; \mu = 4,87 \text{ кНм}; \sigma = 0,113 \text{ кНм},$$

и стандартизированной случайной переменной:

$$u_0 = -E(g)/SD(g) = -38,43/14,86 = -2,59.$$

С учетом коэффициента асимметрии $\omega(g) = -0,342$ получаем вероятность отказа элемента:

$$P_f(g < 0) = P_f(R < E) = \Phi_{LN,U}(-2,59) = 0,00986,$$

что соответствует индексу надежности:

$$\beta = 2,332,$$

и вероятности безотказной работы:

$$P_s = 1 - P_f(g < 0) = 1 - 0,00986 = 0,99014.$$

Полученные результаты хорошо согласуются с данными из работы [4], однако отличаются от предполагаемых индексов надежности $\beta \approx 2,77-3$. При этом полезные нагрузки в расчетах были заданы приближенно через нормативные значения СП 20.13330, в то время как в JCSS и EN 1990/ASCE 7 приведены детальные статистические характеристики. Например, для офисных помещений среднее значение длительной части нагрузки составляет $\mu(q) = 0,5 \text{ кН/м}^2$; стандартное отклонение интенсивности во времени $\sigma_f(q) = 0,3 \text{ кН/м}^2$; стандартное отклонение, описывающее изменение нагрузки в пространстве, $\sigma_{\phi}(q) = 0,6 \text{ кН/м}^2$; период повторяемости — 5 лет; средняя величина переменной части кратковременной нагрузки $\mu(p) = 0,2 \text{ кН/м}^2$; стандартное отклонение, описывающее изменение нагрузки в пространстве, $\sigma_{\phi}(p) = 0,4 \text{ кН/м}^2$; период повторяемости — 1–3 дня. Согласно приблизительной обработке, параметры 50-летних максимумов составят: $E(q_{50}) = 1,80 \text{ кН/м}^2$; $SD(q_{50}) = 0,62 \text{ кН/м}^2$; $V(q_{50}) = 0,34$. Эти значения существенно превышают параметры, задаваемые в соответствии с СП 20.13330. В пересчете для рассматриваемой балки вероятность безотказной работы снизилась до $P_s = 1 - P_f(g < 0) = 1 - 0,03128 = 0,96872$, а индекс надежности до $\beta = 1,862$.

Сравнение с расчетами по методу предельных состояний согласно европейским нормам EN 1990, EN 1991-1-1 и EN 1993-1-1 показало более высокие

требования к несущей способности. Максимальный изгибающий момент составил $M_{yd} = 103,5 \text{ кНм}$, вследствие чего требуемый момент сопротивления увеличился на 27 % ($W_{pl} = 405,8 \text{ см}^3$ против $319,36 \text{ см}^3$ по СП). Это различие объясняется иной системой коэффициентов надежности и интенсивностью полезной нагрузки в EN по сравнению с СП. При учете статистических характеристик нагрузок по JCSS при найденном моменте сопротивления вероятность безотказной работы составила $P_s = 1 - P_f(g < 0) = 1 - 0,00162 = 0,99838$, а индекс надежности достиг значения $\beta = 2,943 \approx 3$.

Согласно EN 1990 для конструкций класса RC2 (аналог КС-2 по ГОСТ 27751) контрольное значение индекса надежности по несущей способности при сроке службы 50 лет должно составлять $\beta \geq 3,8$. Расчет по СП обеспечивает более низкие индексы надежности, чем расчет по европейским нормам, однако ни один из рассмотренных подходов не достигает нормативного уровня. Отличие целевых индексов надежности в нормах России и Евросоюза обусловлено различным подходом к оценке социально-экономических последствий разрушения конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты демонстрируют согласованность с данными отечественных исследований. Так, приведенный в работе [13] диапазон индекса надежности $\beta = 2,3-2,7$ хорошо сопоставим с полученными в настоящей статье значениями $\beta \approx 2,3-2,9$. Вместе с тем расчеты выявили значительные различия в уровне надежности при использовании европейских национальных нормативных баз. Следует отметить ряд причин этих расхождений:

1. Сопротивление стали. В настоящем исследовании математическое ожидание предела текучести определялось исходя из нормального распределения (по ГОСТ 27772), тогда как в EN 1990 и JCSS рекомендуется логнормальная модель.

2. Полезные нагрузки. В расчетах они были заданы приближенно через нормативные значения СП 20.13330, в то время как JCSS и EN 1990/ASCE 7 содержат детальные статистические характеристики временных воздействий и повышенные нормативные (базовые) интенсивности.

3. Система коэффициентов. Европейские нормы используют иную систему коэффициентов надежности и сочетаний и имеют повышенные величины интенсивности нагрузки по сравнению с СП, что приводит к более высоким расчетным усилиям. При этом ни один из рассмотренных подходов не обеспечивает нормативный уровень по EN 1990, что указывает на необходимость совершенствования национальных подходов к обеспечению надежности.

В исследовании не учитывались вариации геометрических параметров (пролет, шаг, размеры профиля), которые влияют на индекс надежности β за счет изменения чувствительности предельной функции

к случайным переменным и перераспределения вкладов в ее статистические моменты. Также не моделировалась взаимная корреляция базовых переменных, ее учет может как увеличивать, так и уменьшать значение β в зависимости от знака и величины корреляции. В рамках работы не определялись коэффициенты чувствительности (α -коэффициенты) метода FORM, характеризующие относительный вклад отдельных случайных величин в вероятность отказа. Изменение геометрических параметров, статистических характеристик или корреляционной структуры, как следствие, приводит к изменению расчетного значения β . Кроме того, при определении суммы и произведений случайных величин, подчиняющихся разным законам, применялся приближенный метод. Для более точной оценки надежности рекомендует-

ся использовать прямое численное интегрирование, реализуемое в специализированных программных комплексах.

Перспективой дальнейшей разработки темы является уточнение вероятностных моделей распределения прочностных характеристик стали и полезной нагрузки, а также разработка упрощенных инженерных методик применения методов надежности. Также важное направление исследований — проведение анализа чувствительности, который даст возможность выявить случайные переменные, вносящие наибольший вклад в дисперсию функции предельного состояния. Это имеет существенную практическую ценность при оптимизации мероприятий по контролю качества и позволяет целенаправленно управлять надежностью проектируемых конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М. : Стройиздат, 1978. 239 с.
2. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений. М. : ACB, 2010. 383 с. EDN QNOTWZ.
3. Мкртычев О.В., Райзер В.Д. Теория надежности в проектировании строительных конструкций. М. : ACB, 2016. 906 с. EDN ZCWYKL.
4. Holický M., Retief J.V. Reliability Assessment of Alternative Eurocode and South African Load Combination Schemes for Structural Design // Journal of the South African Institution of Civil Engineering. 2005. Vol. 47. Issue 1. Pp. 15–20.
5. Du X., Hu Z. First order reliability method with truncated random variables // Journal of Mechanical Design. 2012. Vol. 134. Issue 9. DOI: 10.1115/1.4007150
6. Ellingwood B., Maes M., Michael Bartlett F., Beck A.T., Caprani C., Der Kiureghian A. et al. Development of methods of structural reliability // Structural Safety. 2025. Vol. 113. P. 102474. DOI: 10.1016/j.strusafe.2024.102474. EDN JGIYIV.
7. Пиеничкина В.А., Сухина К.Н., Дубовский М.Е., Глухов А.В. Оценка надежности монолитной железобетонной плиты перекрытия при вводе здания в эксплуатацию // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. № 1 (90). С. 54–62. EDN NMIMHN.
8. Соловьев С.А., Соловьева А.А. Методы вероятностного проектирования элементов строительных конструкций на заданный уровень надежности. Вологда : Вологодский государственный университет, 2022. 99 с. EDN VUWERG.
9. Якубович А.Н., Якубович И.А. Надежность нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов прямоугольного профиля мостовых сооружений // Транспортное строительство. 2023. № 3. С. 24–28. EDN TIYSNG.
10. Holický M., Sýkora M. Reliability approaches affecting the sustainability of concrete structures // Sustainability. 2021. Vol. 13. Issue 5. P. 2627. DOI: 10.3390/su13052627. EDN PWOCMO.
11. Abimbola Yu.Z., Kaura J.M., Wilson U.N. Reliability-Based Analysis of Steel Portal Frame Eurocode Design Criteria Subjected to Flexural and Lateral Torsional Instability // Saudi Journal of Civil Engineering. 2025. Vol. 9. Issue 2. Pp. 37–48. DOI: 10.36348/sjce.2025.v09i02.002. EDN VORTLC.
12. Uzun E.T., Aktaş E. Reliability of Corroded Steel Members Subjected to Elastic Lateral Torsional Buckling // International Journal of Steel Structures. 2021. Vol. 21. Issue 4. Pp. 1478–1501. DOI: 10.1007/s13296-021-00516-8. EDN EWBHYL.
13. Надольский В.В., Голицы М., Сыкора М., Тур В.В. Сопоставление уровней надежности, обеспечиваемых нормами Российской Федерации и Евросоюза // Вестник МГСУ. 2013. № 6. С. 7–20. EDN QGRYLZ.
14. Сухов Ю.Д. Вероятностный метод определения коэффициента сочетаний постоянной нагрузки с временными // Строительная механика и расчет сооружений. 1985. № 1. С. 3–7.
15. Балдин В.А., Гольденблат И.И., Коченов В.И., Пильдиш М.Я., Таль К.Э. Расчет строительных конструкций по предельным состояниям. М. : Стройиздат, 1951. 272 с.
16. Вернези Н.Л. Коэффициент вариации предела текучести металла новых и долгое время эксплуатировавшихся строительных конструкций // Безопасность техногенных и природных систем. 2023. Т. 7. № 3. С. 44–54. DOI: 10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54. EDN PJMKNJ.

17. Соловьева А.А. Вероятностный расчет элементов конструкций покрытий с использованием р-блоков : дисс. ... канд. техн. наук. М., 2025. 180 с.
18. Du X.P., Hu Z. First order reliability method with truncated random variables // *Journal of Mechanical Design*. 2012. Vol. 134. Issue 9. DOI: 10.1115/1.4007150
19. Melcher J., Kala Z., Holický M., Fajkus M., Rozlivka L. Design characteristics of structural steels based on statistical analysis of metallurgical products // *Journal of Constructional Steel Research*. 2004. Vol. 60. Issue 3–5. Pp. 795–808. DOI: 10.1016/s0143-974x(03)00144-5
20. Strzelecki P., Sempruch J. Determination of the Statistical Power of Fatigue Characteristics in Rela-

tion to the Number of Samples // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Issue 6. P. 2440. DOI: 10.3390/app14062440. EDN UEGVKH.

21. Chen G., Yang D., Liu Y., Guo H. System reliability analyses of static and dynamic structures via direct probability integral method // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2022. Vol. 388. P. 114262. DOI: 10.1016/j.cma.2021.114262. EDN FOQYBL.

22. Song C., Kawai R. Monte Carlo and variance reduction methods for structural reliability analysis : a comprehensive review // *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2023. Vol. 73. P. 103479. DOI: 10.1016/j.pro bengmech. 2023.103479. EDN MGFYWI.

Поступила в редакцию 26 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 12 января 2026 г.

Одобрена для публикации 13 апреля 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: **Антон Евгеньевич Кубасевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 1060856; anton_kubasevich@mail.ru.

REFERENCES

1. Rzhantsyn A.R. *Theory of structural reliability design*. Moscow, Stroyizdat, 1978; 239. (rus.).
2. Rayzer V.D. *Theory of structural reliability*. Moscow, ASV, 2010; 384. EDN QNOTWZ. (rus.).
3. Mkrtychev O.V., Rayzer V.D. *Theory of reliability in the design of building structures*. Moscow, ASV, 2016; 906. EDN ZCWYKL. (rus.).
4. Holický M., Retief J.V. Reliability Assessment of Alternative Eurocode and South African Load Combination Schemes for Structural Design. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*. 2005; 47(1):15-20.
5. Du X., Hu Z. First order reliability method with truncated random variables. *Journal of Mechanical Design*. 2012; 134(9). DOI: 10.1115/1.4007150
6. Ellingwood B., Maes M., Michael Bartlett F., Beck A.T., Caprani C., Der Kiureghian A. et al. Development of methods of structural reliability. *Structural Safety*. 2025; 113:102474. DOI: 10.1016/j.strusafe.2024.102474. EDN JGIYIV.
7. Pshenichkina V.A., Sukhina K.N., Dubovskiy M.E., Glukhov A.V. Assessment of the reliability of a monolithic reinforced concrete floor slab during the commissioning of a building. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2023; 1(90):54-62. EDN NMIMHN. (rus.).
8. Solov'ev S. A., Solov'eva A.A. *Probabilistic design methods for structural elements at a given reliability*

level. Vologda, Vologda State University, 2022; 99. EDN VUWERG. (rus.).

9. Yakubovich A.N., Yakubovich I.A. Reliability of normal sections of bending reinforced concrete elements of rectangular profile of bridge structures. *Transport Construction*. 2023; 3:24-28. EDN TIYSNG. (rus.).

10. Holický M., Sýkora M. Reliability approaches affecting the sustainability of concrete structures. *Sustainability*. 2021; 13(5):2627. DOI: 10.3390/su13052627. EDN PWOCMO.

11. Abimbola Yu.Z., Kaura J.M., Wilson U.N. Reliability-Based Analysis of Steel Portal Frame Eurocode Design Criteria Subjected to Flexural and Lateral Torsional Instability. *Saudi Journal of Civil Engineering*. 2025; 9(2):37-48. DOI: 10.36348/sjce.2025.v09i02.002. EDN VORTLC.

12. Uzun E.T., Aktaş E. Reliability of Corroded Steel Members Subjected to Elastic Lateral Torsional Buckling. *International Journal of Steel Structures*. 2021; 21(4):1478-1501. DOI: 10.1007/s13296-021-00516-8. EDN EWBHYL.

13. Nadolski V.V.E., Holický M., Sýkora M., Tur V.V. Comparison of reliability levels provided by the eurocodes and standards of the Russian Federation. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013; 6:7-20. EDN QGRYLZ. (rus.).

14. Sukhov Yu.D. Probabilistic method for determining the load combination factor of permanent

and variable loads. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 1985; 1:3-7. (rus.).

15. Baldin V.A., Goldenblat I.I., Kochenov V.I., Pildish M.Ya., Tal K.E. *Limit state design of structures*. Moscow, Stroyizdat, 1951; 272. (rus.).

16. Vernezi N.L. Variation coefficient of metal yield strength in new and long-used building structures. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023; 7(3):44-54. DOI: 10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54. EDN PJMKNJ. (rus.).

17. Solovyeva A.A. *Probabilistic analysis of structural roof elements using p-blocks : PhD thesis in Technical Sciences*. Moscow, 2025; 180. (rus.).

18. Du X.P., Hu Z. First order reliability method with truncated random variables. *Journal of Mechanical Design*. 2012; 134(9). DOI: 10.1115/1.4007150

19. Melcher J., Kala Z., Holický M., Fajkus M., Rozlivka L. Design characteristics of structural steels based

on statistical analysis of metallurgical products. *Journal of Constructional Steel Research*. 2004; 60(3-5):795-808. DOI: 10.1016/s0143-974x(03)00144-5

20. Strzelecki P., Sempruch J. Determination of the Statistical Power of Fatigue Characteristics in Relation to the Number of Samples. *Applied Sciences*. 2024; 14(6):2440. DOI: 10.3390/app14062440. EDN UEGVKH.

21. Chen G., Yang D., Liu Y., Guo H. System reliability analyses of static and dynamic structures via direct probability integral method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2022; 388:114262. DOI: 10.1016/j.cma.2021.114262. EDN FOQYBL.

22. Song C., Kawai R. Monte Carlo and variance reduction methods for structural reliability analysis: a comprehensive review. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2023; 73:103479. DOI: 10.1016/j.probengmech.2023.103479. EDN MGFYWI.

Received August 26, 2025.

Adopted in revised form on January 12, 2026.

Approved for publication on April 13, 2026.

B I O N O T E S : **Anton E. Kubasevich** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 1060856; anton_kubasevich@mail.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.159.2

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1101-1113

Практическое применение стохастических расчетов конечной осадки оснований плитных фундаментов

Михаил Петрович Кропоткин¹, Игорь Константинович Фоменко²,
Андрей Александрович Горлов²

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

² Российский государственный геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе (МГРИ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Моделирование геотехнических систем сопряжено с проблемой неточности и неполноты данных о моделируемой системе. Существующие детерминистические методы расчета оснований не позволяют количественно оценить риски, связанные с пространственной изменчивостью свойств грунтов. Цель исследования — демонстрация применения стохастического подхода на основе рандомизированного метода конечных элементов (МКЭ) для оценки надежности и риска превышения допустимых осадок фундаментов храмового комплекса в Москве.

Материалы и методы. Использованы результаты инженерно-геологических изысканий на основе данных электро-контактного динамического зондирования (ЭДЗ), в ходе которого была проанализирована неоднородность механических свойств грунта в пространстве. Для прогнозирования конечной осадки основания применялись два подхода: детерминированный расчет по методу послойного суммирования и численное моделирование методом конечных элементов в OPTUM G2. Стохастический анализ проведен с применением метода случайных конечных элементов (Random Finite Element Method — RFEM), в котором пространственная изменчивость параметров грунта задается с помощью теории случайного поля. Заданы вертикальные и горизонтальные корреляционные расстояния, коэффициенты вариации деформационных характеристик грунта для каждого инженерно-геологического элемента (ИГЭ).

Результаты. Детерминированные расчеты методом послойного суммирования показали осадки в пределах 22–51 мм, не превышающие допустимых значений. Однако численное моделирование с помощью МКЭ выявило значительно большие осадки (56–118 мм в зависимости от принятого модуля деформации насыпных грунтов). Вероятностный анализ продемонстрировал, что при модуле деформации насыпных грунтов 5 МПа вероятность превышения предельной осадки для фундамента I составляет 61 %, для фундамента II — 23 %. Установлена высокая вероятность (около 9 %) возникновения недопустимой неравномерности осадки между фундаментами II и III.

Выводы. Показано, что традиционные детерминистические методы расчета могут не выявлять потенциально опасные сценарии работы основания. Применение стохастической методологии (RFEM) позволяет количественно оценить надежность основания и риски превышения предельных деформаций. Для внедрения современных методов расчета требуется уточнение нормативной базы, в частности, методики определения глубины зоны влияния и обработки данных полевых исследований с учетом пространственной изменчивости свойств грунтов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: неопределенность, осадка, стохастический подход, зона влияния, ЭДЗ, пространственная изменчивость грунтов, физико-механические свойства грунтов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кропоткин М.П., Фоменко И.К., Горлов А.А. Практическое применение стохастических расчетов конечной осадки оснований плитных фундаментов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 7. С. 1101–1113. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1101-1113

Автор, ответственный за переписку: Михаил Петрович Кропоткин, singeos@yandex.ru.

Practical application of stochastic calculations of the final precipitation of plate foundations

Mikhail P. Kropotkin¹, Igor K. Fomenko², Andrey A. Gorlov²

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

² Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Modelling of geotechnical systems faces the challenge of inaccuracy and incompleteness of data about the system being modelled. Existing deterministic methods for foundation design do not allow for a quantitative assessment of

risks associated with the spatial variability of soil properties. The aim of this research is to demonstrate the application of a probabilistic-stochastic approach based on the Random Finite Element Method (RFEM) for assessing the reliability and risk of exceeding allowable settlements of the foundations of a temple complex in Moscow.

Materials and methods. The study used engineering geological investigation data obtained by electric-contact dynamic sounding (ECDS) to analyze the spatial heterogeneity of soil mechanical properties. Two approaches were used to predict the final precipitation of the base: deterministic calculation using the layer-by-layer summation method and numerical modelling using the finite element method in OPTUM G2. Stochastic analysis was performed using the Random Finite Element Method (RFEM), in which the spatial variability of soil parameters is determined using random field theory. Vertical and horizontal correlation distances, as well as coefficients of variation for the deformation characteristics of the soil, were defined for each engineering-geological element.

Results. Deterministic calculations using the layer-by-layer summation method showed settlements in the range of 22–51 mm, not exceeding allowable limits. However, numerical modelling using FEM revealed significantly larger settlements (56–118 mm, depending on the assumed deformation modulus of the fill soils). Probabilistic analysis demonstrated that with a fill soil deformation modulus of 5 MPa, the probability of exceeding the limiting settlement for Foundation I is 61 %, and for Foundation II, 23 %. A high probability (approximately 9 %) of the occurrence of inadmissible differential settlement between Foundations II and III was established.

Conclusions. It is shown that traditional deterministic calculation methods may fail to identify potentially hazardous foundation performance scenarios. The application of stochastic methodology (RFEM) allows for a quantitative assessment of foundation reliability and the risks of exceeding limiting deformations. The implementation of modern calculation methods requires refinement of the regulatory framework, particularly regarding the methodology for determining the depth of the influence zone and the processing of field test data considering the spatial variability of soil properties.

KEYWORDS: uncertainty, settlement, stochastic approach, zone of influence, electric-contact dynamic sounding (ECDS), spatial variability of soils, physico-mechanical properties of soils

FOR CITATION: Kropotkin M.P., Fomenko I.K., Gorlov A.A. Practical application of stochastic calculations of the final precipitation of plate foundations. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(7):1101-1113. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1101-1113 (rus.).

Corresponding author: Mikhail P. Kropotkin, singeos@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Неточность и неполнота исходных данных ведут к неопределенности при моделировании сложных систем. Особенно критичен этот вопрос в строительстве, где обеспечение надежности зданий и сооружений определяет безопасность их эксплуатации. В геотехническом проектировании приняты два базовых концептуальных утверждения, которые можно сформулировать следующим образом:

1. Абсолютно надежное геотехническое решение не существует.
2. Количественная оценка и управление надежностью возможны при использовании стохастического подхода [1–3].

В настоящей статье для расчета конечной осадки основания фундамента применялись метод конечных элементов (МКЭ) и рандомизированный метод конечных элементов (RFEM). Расчеты осадок выполнены в программном комплексе (ПК) OPTUM G2. Для определения физико-механических свойств, корреляционных расстояний и коэффициента вариации свойств грунтов использовались результаты статического и электроконтактного динамического зондирования (ЭДЗ).

Следует учитывать, что использование данных методов требует частичного пересмотра и дополнения действующих нормативных документов, в частности, в области расчета глубины активной зоны. Это, в свою очередь, значительно повысит качество инженерно-геологических данных и возможность их применения при численных расчетах [4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данные проблемы были рассмотрены на примере проектировавшегося храма в ЮАО г. Москвы. Внешний вид храма показан на рис. 1. Здание представляет собой проект храмового сооружения с габаритами в плане 63 × 25 м. Важной конструктивной особенностью является отсутствие подвала. Основные несущие конструкции запроектированы в виде неполного железобетонного каркаса с наружными несущими стенами из ячеистобетонных блоков. Планируемый тип фундамента — железобетонные плиты на естественном основании, каждая часть здания опирается на свой фундамент (рис. 2).



Рис. 1. Внешний вид проектируемого храма. Фундамент I находится под колокольной, фундамент III в правой части после арки

Fig. 1. External view of the designed temple. Foundation I is under the bell tower, Foundation III is in the right part beyond the arch

В ходе проведения инженерно-геологических изысканий на территории указанного объекта было пробурено пять инженерно-геологических скважин глубиной от 10 до 20 м, проведено 4 испытания грунтов методом статического зондирования и 3 испытания методом электроконтактного динамического зон-

дирования. Расположение выработок и направление линий инженерно-геологических разрезов показаны на рис. 2.

Согласно техническому заданию, глубина заложения всех фундаментов 2,0 м от дневной поверхности. Средние давления под подошвой трех плитных

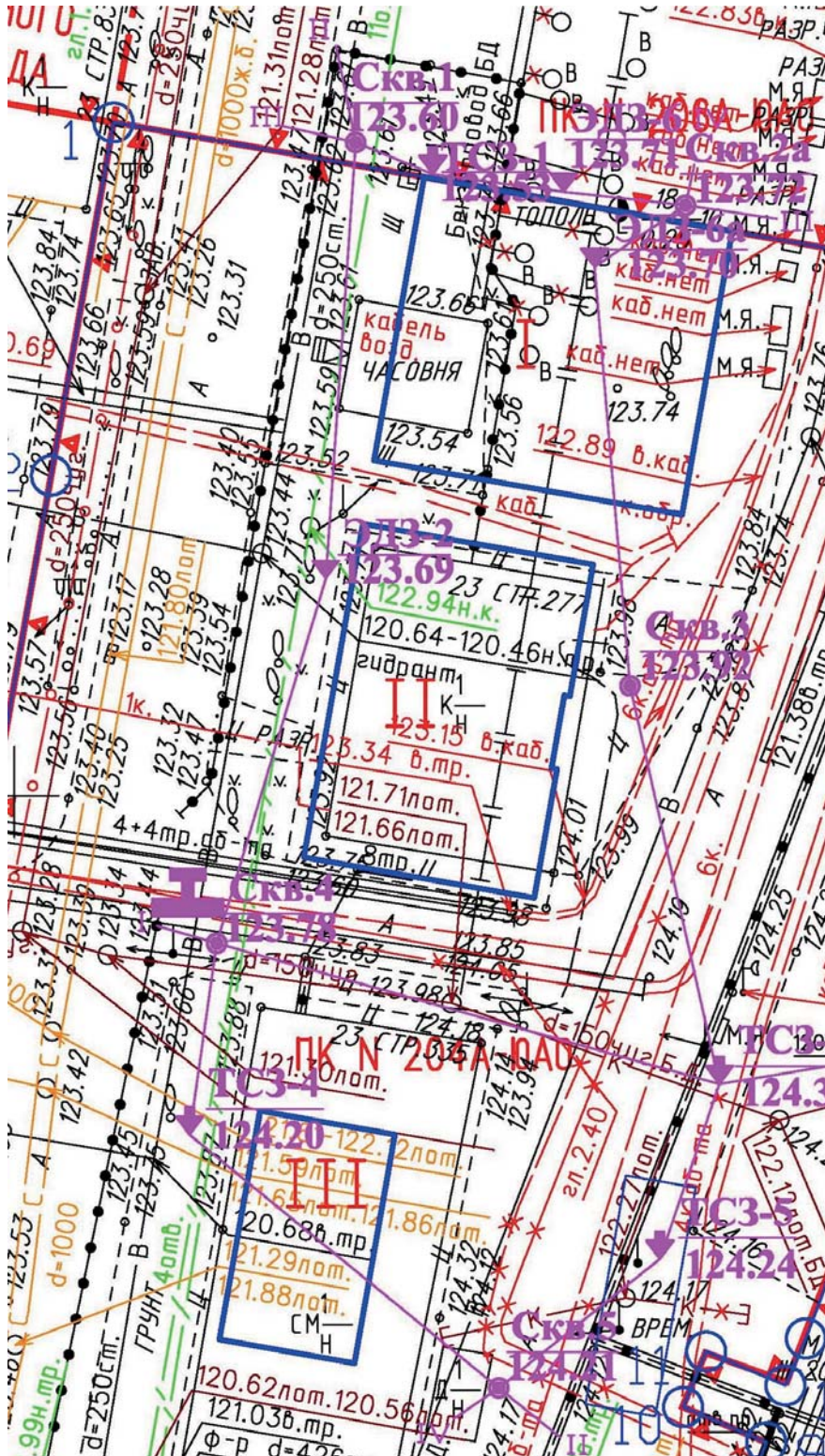


Рис. 2. Схема расположения фундаментов, выработок и расчетного разреза (II–II)

Fig. 2. Layout of foundations, boreholes/wells and the design cross-section (II–II)

фундаментов приведены на рис. 3. Предельные величины осадок оснований фундаментов: максимальная осадка не более 120 мм, максимальная относительная деформация не более 0,002.

Площадка строительства расположена на второй надпойменной террасе р. Москва. Современные верхне-четвертичные аллювиальные отложения (aQ_{III-IV}) представлены песками от пылеватых до средней крупности и суглинками различной консистенции, мощность их 4,0–8,0 м. С поверхности они перекрыты толщей техногенных насыпных грунтов (tQ_{IV}) мощностью 3,4–6,4 м. Грунты слежавшиеся представлены песками от пылеватых до средней крупности, дресвой, реже супесями пластичными и суглинками тугопластичными. Подстилаются аллювиальные отложения верхнеюрскими глинами и алевроитами киммериджского (J_3km) и оксфордского ярусов (J_3ox)¹.

Реальные грунты основания обладают значительной изменчивостью физико-механических свойств (табл. 1) как закономерной, так и случайной. Осо-

бенно ярко изменчивость и анизотропность свойств выражены у техногенных грунтов. Это обусловлено тем, что сдвиговая прочность и деформируемость их зависят не только от наиболее сохранившихся частей и блоков исходных грунтов, но и от зон между ними. Эти зоны, представляющие собой ослабленные участки с нарушенной структурой, существенно влияют на поведение массива в целом. Между тем при инженерно-геологических исследованиях, как правило, для лабораторного изучения монолиты отбираются из наиболее сохранившихся частей и блоков. При этом свойства таких образцов сильно отличаются от свойств массива основания, завышая реальные характеристики.

Более достоверную информацию о свойствах насыпных грунтов можно получить с помощью полевых методов, в частности статического и динамического зондирования. Поскольку статическое зондирование общеизвестно, коротко опишем особенности аппаратуры и обработки результатов использованного метода динамического зондирования.

Электроконтактное динамическое зондирование представляет собой комплексный полевой метод, применяемый для изучения песчаных и глинистых грунтов. Помимо классического динамического зондирования, методика включает в себя токовый каротаж,

¹ Технический отчет об инженерно-геологических изысканиях для строительства храма блаженной Ксении Петербургской в Даниловском по адресу: г. Москва, Автозаводская улица, вл. 23, стр. 277 // ООО НПП «Сингеос». 2021.

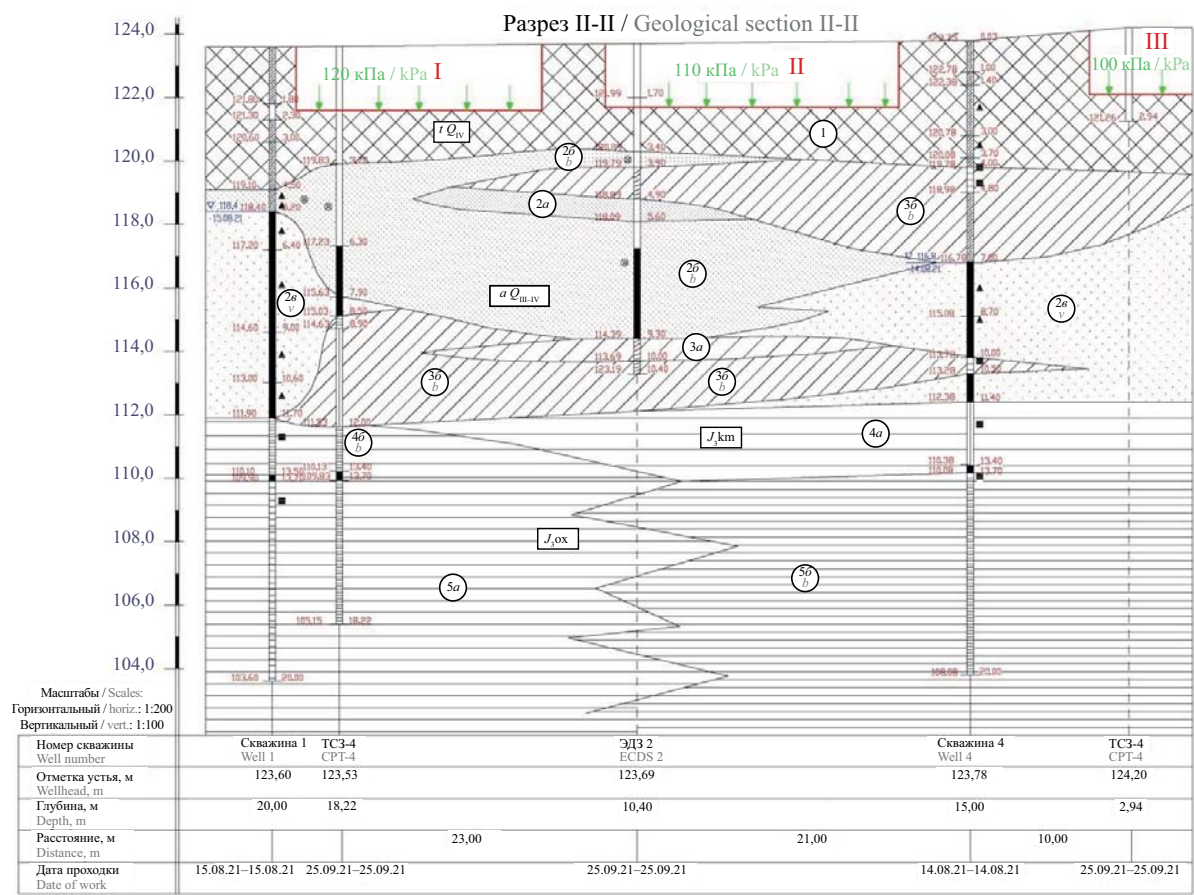


Рис. 3. Инженерно-геологический разрез, по которому выполнены расчеты осадок

Fig. 3. Engineering-geological section used for settlement calculations

Табл. 1. Используемые физико-механические свойства грунтов

Table 1. Physical and mechanical properties of soils used in the analysis

Геологический индекс Geological index	Номер инженерно-геологических элементов Number of engineering-geological elements	Описание грунтов / Soil description	Плотность грунта γ , т/м ³ / Soil density, γ , t/m ³	Модуль деформации E , МПа / Deformation modulus E , MPa	Угол внутреннего трения φ , ° Angle of internal friction φ , °	Удельное сцепление C , кПа / Cohesion C , kPa	Коэффициент Пуассона Poisson's ratio
tQ _{IV}	1	Насыпной грунт Bulk soil	16,5	8/5*	18	6	0,29
aQ _{III+IV}	2a	Песок пылеватый, рыхлый, влажный Sand (dusty, loose, moist)	16,8	4,5	19	0,5	0,33
	2б / b	Песок пылеватый, реже мелкий, средней плотности с линзами плотного, влажный и водонасыщенный Sand (dusty, less often fine, of medium density with dense lenses, moist and water saturated)	17,6	17	28	2,5	0,33
	2в / v	Песок средней крупности, средней плотности с линзами плотного, водонасыщенный Sand (medium size, medium density with dense lenses, water saturated)	18	41	36,5	2	0,31
	3a	Суглинок мягкопластичный, редко текучепластичный Loam (soft-ductile, rarely fluid ductile)	18,9	6,5	12	15	0,35
	3б / b	Суглинок тугопластичный, реже полутвердый с линзами супеси пластичной / Loam (ductile, less often semi-solid with lenses of ductile sandy loam)	19,3	18	18,5	28	0,35
J _{3km}	4a	Алевриты и глины легкие полутвердые, с прослоями тугопластичных / Loams and clays (sandy, semi-solid, with layers of ductile loams/clays)	19,2	20	17,5	40	0,39
	4б / b	Алевриты и глины легкие твердые Loams and clays (sandy, solid)	18,4	27	21,5	60	0,4
J _{3ox}	5a	Глины пылеватые полутвердые Clays (dusty, semi-solid)	17,5	20	17,5	65	0,41
	5в / v	Глины пылеватые твердые Clays (dusty, solid)	17,7	26	19	63	0,42

Примечание: * — в числителе нормативный модуль деформации по объекту в целом, в знаменателе то же по выработкам, находящимся в районе расчетного разреза II–II.

Note: * — in the numerator: design deformation modulus for the entire structure; in the denominator: the same for excavations located within the area of design cross-section II–II.

при котором в ходе погружения зонда фиксируются изменения силы тока на электроде в его наконечнике. Данные токового каротажа дают возможность разделить грунты по литологическому составу. Параллельно результаты динамического зондирования характеризуют физико-механические свойства этих грунтов. Совместная интерпретация обоих видов сведений

формирует таким образом целостную картину строения и характеристик грунтового массива.

Благодаря простоте конструкции и компактности установка ЭДЗ может применяться в условиях, где использование стандартного оборудования нецелесообразно или невозможно. На рис. 4 показаны комплектация и внешний вид установки. Процедуры

тарировки приборов и наконечников, а также специфика методики полевых работ детально изложены в литературных источниках² [5, 6].

Одним из ключевых преимуществ этого метода является возможность получить большое количество данных об условном динамическом сопротивлении грунта ρ_d , которые можно математически обработать. Использование специальной методики позволяет приблизительно оценить прочностные и деформационные свойства массива, включая ослабленные зоны, механические характеристики которых изучить другими методами не всегда представляется возможным. Кроме того, результаты ЭДЗ дают возможность провести количественный анализ неоднородности массива и применить эту информацию в стохастических расчетах.

При обработке результатов зондирования сведения, полученные с глубины до 1,0 м, исключены из анализа. Также были исключены аномально высокие показания динамического сопротивления грунта, обусловленные присутствием крупных включений, в основном фрагментов строительного мусора.

Обработка данных ЭДЗ выполнялась в рамках действующих нормативов и методических указаний [6, 7]. В ходе анализа были применены эмпирические зависимости, установленные в исследованиях Производственного и научно-исследовательского института по инженерным изысканиям в строительстве³. На основе этой информации в расчетную методику интегрированы дополнительные поправочные коэффициенты, учитывающие упругие деформации колонны штанг и специфику взаимодействия зонда с грунтовой средой.

Для насыпных грунтов данные ЭДЗ (с шагом записи 10 см) интерпретировались по особому алгоритму. В расчет принимались только минимальные поинтервальные значения динамического сопротивления грунта ρ_d , характерные для краевых зон отдельных обломков, участков их контакта и заполняющих прослоев более слабого, неструктурированного и часто более влажного грунта. Именно эти элементы определяют прочностные и деформационные свойства насыпного массива в целом. Отобранные значения ρ_d подвергались статистическому анализу и пересчитывались в механические характеристики с использованием пониженных (на 20–40 % в зависимости от параметров грунта) коэффициентов перехода по сравнению с грунтами ненарушенного сложения.

Аналогичный принцип был применен при обработке данных статического зондирования. Результаты обоих видов зондирования статистически обоб-

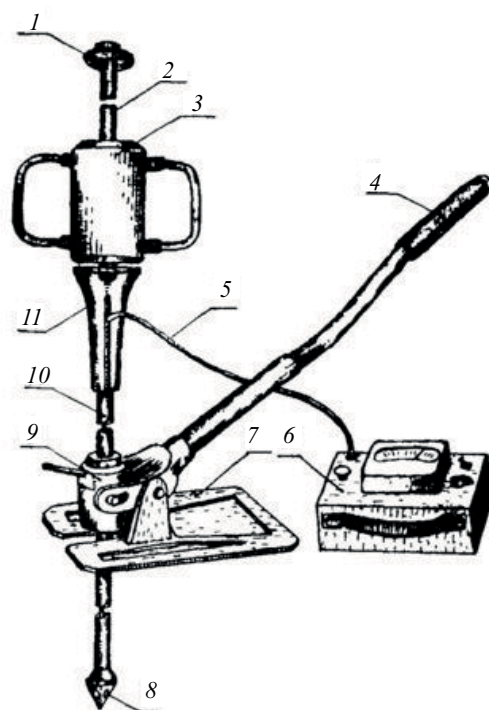


Рис. 4. Общий вид установки электроконтактного динамического зондирования: 1 — ограничитель высоты подъема молота; 2 — направляющая штанга; 3 — молот; 4 — рычаг извлекающего устройства; 5 — кабель, соединяющий контакты наконечника с измерительным прибором; 6 — измерительный прибор; 7 — опорная плита; 8 — инвентарный наконечник; 9 — самозахватывающий механизм; 10 — штанги; 11 — упор для молота

Fig. 4. General view of the electric-contact dynamic sounding setup: 1 — hammer lift height limiter; 2 — guide rod; 3 — hammer; 4 — extraction device lever; 5 — cable connecting the tip contacts to the measuring instrument; 6 — measuring instrument; 7 — base plate; 8 — inventory tip; 9 — self-latching mechanism; 10 — rods; 11 — hammer stop

щались по слоям, и на основе описанной методики определялись расчетные характеристики грунтов как для отдельной точки, так и для массива в целом.

Для последующего стохастического моделирования методом RFEM вертикальное корреляционное расстояние (CL_y) устанавливалось по эмпирическому методу Ванмарке (рис. 5). Этот метод основан на усреднении расстояний между последовательными пересечениями реализацией поля своего тренда. С достоверностью 80 % пространственную корреляцию можно оценить по формуле:

$$CL_y = 0,8 \frac{\sum h_i}{n}, \quad (1)$$

где h — длина i -го участка пересечения линии тренда, м; n — количество этих участков пересечения линии тренда.

Горизонтальное корреляционное расстояние CL_x рассчитывается по аналогичной методике. Измерялось расстояние между точками зондирования, в ко-

² Руководство по электроконтактному динамическому зондированию грунтов. М. : ВНИИ трансп. стр-ва, 1983. 62 с.

³ Изменения свойств грунтов под влиянием природных и антропогенных воздействий : сб. науч. тр. / под ред. Р.С. Зиянгинова. М. : Стройиздат, 1981. 131 с.

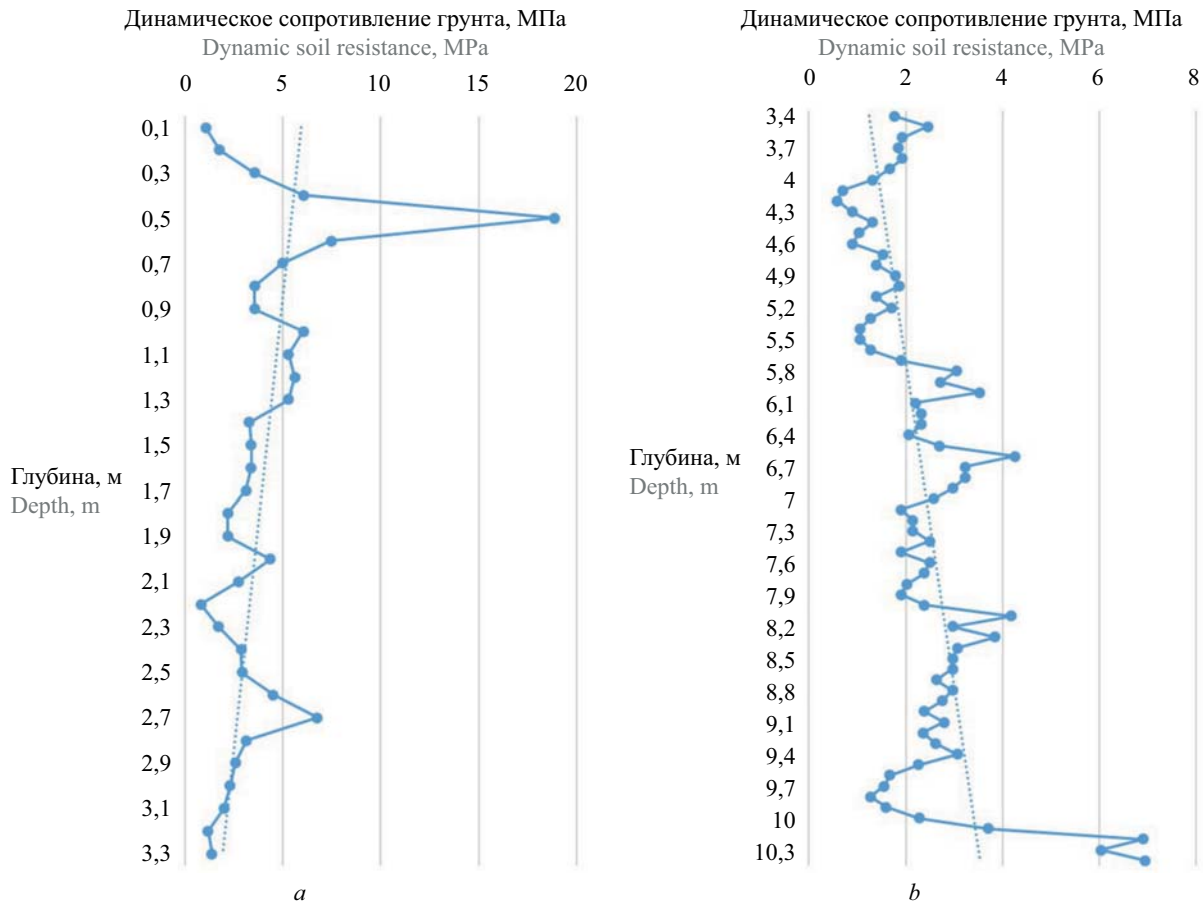


Рис. 5. Графики к определению вертикального корреляционного расстояния CL_y по ЭДЗ: *a* — насыпные грунты; *b* — природные грунты

Fig. 5. Graphs for determining the vertical correlation distance CL_y from ECDS data: *a* — bulk soils; *b* — natural soils

торых были получены параметры грунтов (данные динамического сопротивления, либо лобовое сопротивление) и относительно горизонтальной линии определялось количество интервалов пересечения.

Коэффициент вариации рассчитывался на основе всего массива данных. Значения коэффициентов вариации приведены в табл. 2.

Первоначально расчеты осадок всех трех фундаментов зданий раздельно выполнены методом послойного суммирования в соответствии с СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» п. 5.6.31. Расчет осадки в ПК OPTUM G2 выполнялся МКЭ, стохастические расчеты осадок реализованы с использованием рандомизированного метода конечных элементов (RFEM). Это относительно новый метод вероятностного анализа, в котором используется комбинация двумерной теории случайных полей и метода конечных элементов.

Пространственная изменчивость свойств грунта при применении данного подхода моделируется с помощью теории случайных полей [8], согласно этой теории, свойства грунта в пределах каждого ИГЭ или расчетного геологического элемента (РГЭ) представляют собой случайную величину. Эта величина описывается функцией распределения вероятностей

и обнаруживает статистическую связь со значениями в соседних зонах массива [9–14]. Параметры грунта задаются в узлах конечно-элементной сетки модели. Между узлами устанавливается корреляционная зависимость, определяемая вертикальным и горизонтальным корреляционными расстояниями, а также коэффициентами вариации параметров. Функция автокорреляции может быть оценена на основе сведений натурных или лабораторных испытаний, выполненных в различных точках массива, и рассчитана с использованием функции коэффициента корреляции Маркова:

$$R(\tau_x, \tau_y) = \exp \left\{ - \sqrt{ \left(\frac{2\tau_x}{\theta_x} \right)^2 + \left(\frac{2\tau_y}{\theta_y} \right)^2 } \right\}, \quad (2)$$

где $R(\tau_x, \tau_y)$ — коэффициент автокорреляции, τ_x и τ_y — абсолютные расстояния между двумя точками в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно; θ_x и θ_y — корреляционные расстояния в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно [15].

Важной особенностью выполненных численных расчетов является методика расчета глубины актив-

Табл. 2. Параметры при стохастическом расчете
Table 2. Parameters used in the stochastic analysis

Номер ИГЭ EGE number	Коэффициенты вариации, % Coefficients of variation, %	Корреляционное расстояние X, м Correlation distance X, m	Корреляционное расстояние Y, м Correlation distance Y, m
1	26	6,5	0,38
3б / b	29	6,5	0,70
2б / b	29	6,5	0,70
2а	29	6,5	0,70
2в / v	29	6,5	0,70
3а	29	6,5	0,70
4б / b	29	6,5	0,70
4а	29	6,5	0,70
5а	14	30 (предполагаемое расстояние estimated distance)*	1 (предполагаемое расстояние estimated distance)*
5б / b	14	30 (предполагаемое расстояние estimated distance)*	1 (предполагаемое расстояние estimated distance)*

Примечание: * — данные корреляционные расстояния приняты на основе ранее выполненных расчетов для аналогичных грунтов.
Note: * — these correlation distances are adopted based on previously performed calculations for similar soils.

ной зоны, она определена согласно К. Терцаги [16], по формуле:

$$Z_l = 2B(1 + \log L/B), \tag{3}$$

где B — ширина; L — длина фундамента.

Корректность назначения граничных условий, в частности размеров (глубины) активной зоны, ключевым образом влияет на эффективность применения численного моделирования, а значит и качество результата [1–4].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Методом послойного суммирования получены следующие результаты (при модуле деформации насыпных грунтов 8 МПа):

- 1. Плита I — сжимаемая толща — 11,7 м, расчетная осадка — 51,4 мм.
- 2. Плита II — сжимаемая толща — 9,3 м, расчетная осадка — 31,0 мм.
- 3. Плита III — сжимаемая толща — 9,8 м, расчетная осадка — 21,8 мм.

Таким образом, полученные расчетные осадки значительно меньше предельно допустимых по техническому заданию. Неравномерность осадок между фундаментами I и II может оказаться выше допустимой, между фундаментами II и III она находится в допустимых пределах.

Результаты численных расчетов осадки фундаментов (рис. 6) в зависимости от принятого модуля деформации насыпных грунтов приведены в табл. 3.

Средние величины расчетных осадок, при численном моделировании, значительно больше полученных методом послойного суммирования. Отметим, что при расчете методом послойного суммирования разность осадок больше между плитами I и II и меньше между плитами II и III, численные расчеты показали обратное соотношение.

Обработка данных, получаемых при стохастическом расчете, определение стандартного отклонения и среднего значения общих деформаций позволяют построить кумулятивную кривую функции распределения (рис. 7), на основе которой устанавливается вероятность превышения заданного значения осадки (табл. 4).

При анализе возможной неравномерности осадок (табл. 5) необходимо учитывать, что наиболее неблагоприятным является случай, когда на одном из соседних фундаментов осадки с заданной вероятностью максимальны, а на другом — минимальны.

Расчет с помощью МКЭ показал недопустимо большую разность осадок между фундаментами II и III не только в стохастической, но и в детерминированной постановке. Вероятностный расчет продемонстрировал возможность, причем весьма реальную (*вероятность события = $0,3 \cdot 0,3 = 9\%$), превышения допустимой неравномерности осадок в 1,5–2 и более раз, что явно ведет к аварийной ситуации.

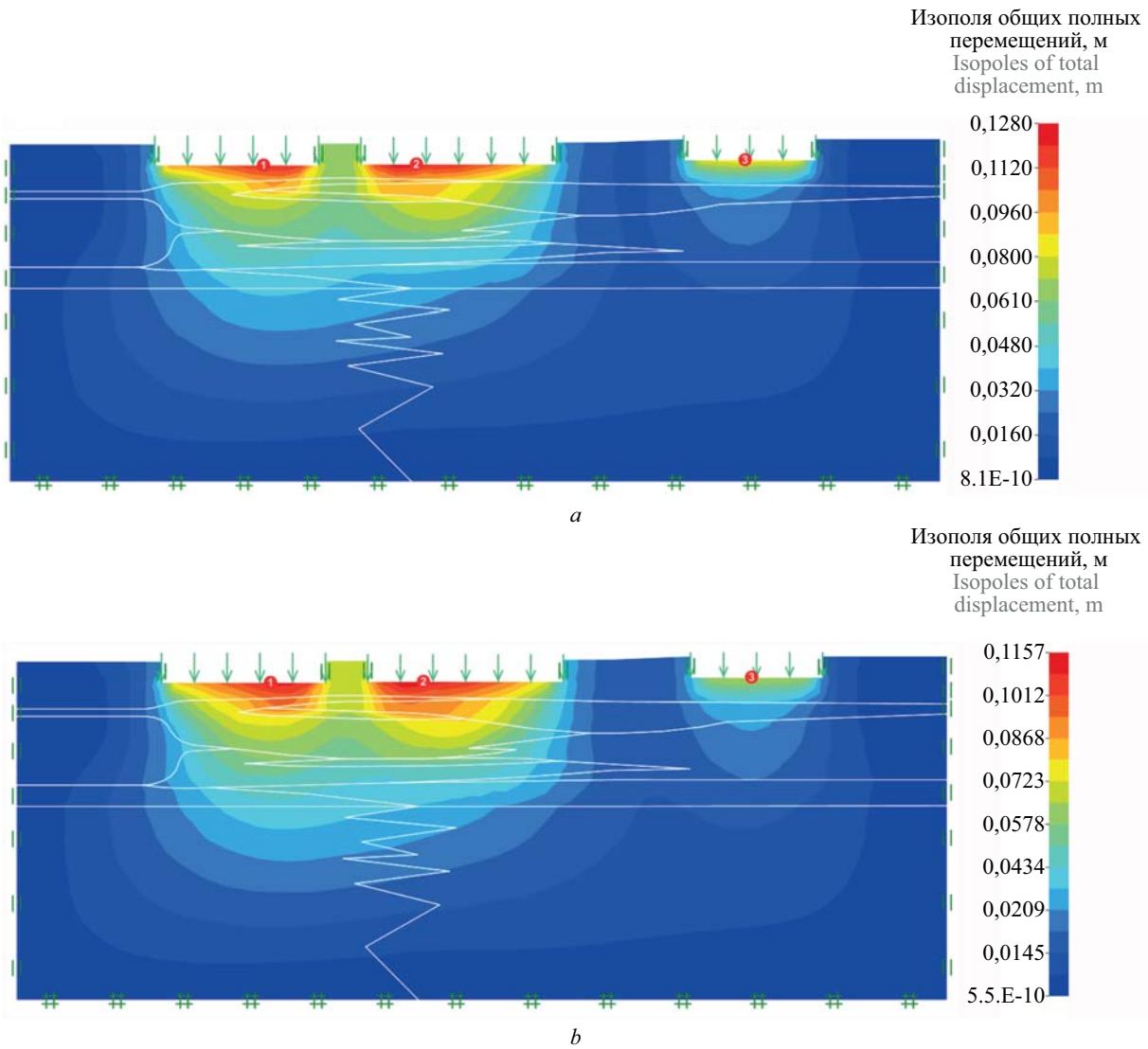


Рис. 6. Результат стохастического расчета осадки фундамента: *a* — модуль деформации насыпных грунтов 5 МПа; *b* — модуль деформации насыпных грунтов 8 МПа

Fig. 6. The result of stochastic calculation of the foundation precipitation: *a* — the modulus of deformation of bulk soils is 5 MPa; *b* — the modulus of deformation of bulk soils is 8 MPa

Табл. 3. Осадки фундаментов по результатам детерминированного и стохастического расчетов

Table 3. Foundation settlements from deterministic and stochastic analysis results

Модуль деформации насыпных грунтов ИГЭ-1, МПа Deformation modulus of fill soils EGE-1, MPa	Номер плитного фундамента Plate foundation number	Детерминированный расчет, см Deterministic calculation, cm	Стохастический расчет (вероятность 50 %), см Stochastic calculation (probability 50 %), cm
5	I	11,8	12,2
	II	11	11,4
	III	7	7,3
8	I	10,7	11,1
	II	10	10,5
	III	5,6	5,8

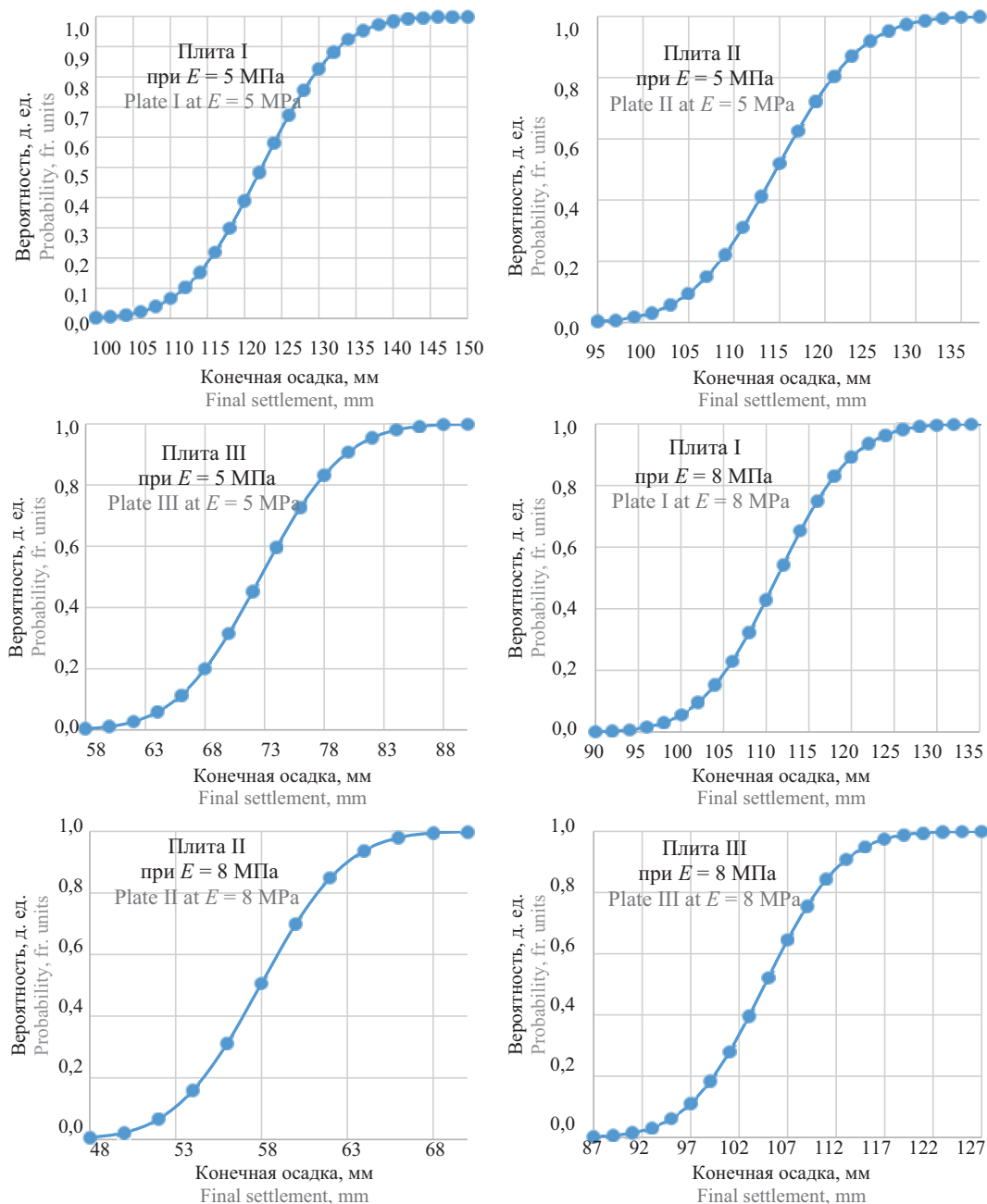


Рис. 7. Кумулятивные кривые функции распределения общих деформаций по результатам стохастического расчета при разном модуле деформации насыпных грунтов

Fig. 7. Cumulative distribution functions of total deformations from stochastic analysis results for different deformation moduli of fill soils

Табл. 4. Вероятность превышения допустимых величин осадок фундаментов

Table 4. Probability of exceeding allowable foundation settlements

Модуль деформации насыпных грунтов ИГЭ-1, МПа / Deformation modulus of fill soils EGE-1, MPa	Номер плитного фундамента Plate foundation number	Вероятность превышения предельной осадки, % / Probability of exceeding the limiting settlement, %
5	I	61
	II	23
	III	0
8	I	10
	II	1
	III	0

Табл. 5. Возможность превышения допустимых неравномерностей осадок

Table 5. Probability of exceeding allowable differential settlements

Модуль деформации насыпных грунтов ИГЭ-1, МПа Deformation modulus of fill soils EGE-1, MPa	Сравниваемые плиты Compared plates	Вероятность* Probability*	Разность осадок, мм Difference in settlements, mm	Расстояние, м Distance, m	Допустимая разность осадок, мм / Allowable settlement difference, mm
5	I–II	0,3	127 – 111 = 16	4,6	9
	II–III	0,3	118 – 70 = 48	13,0	26
8	I–II	0,3	115 – 101 = 14	4,6	9
	II–III	0,3	108 – 56 = 52	13,0	26

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующая методология расчетов, основанная на детерминистическом подходе, должна в конечном итоге трансформироваться в концепцию применения вероятностных подходов в геотехнике. Стохастическая методология позволяет оценить не только формальную надежность основания на базе целого ряда не всегда оправданных допущений (нормальный закон распределения свойств, отсутствие трендов и т.д.), но и выполнить расчет надежности, количественный и качественный анализ риска⁴ [17]. Через выявление основных факторов, обуславливающих неопределенность, может быть выполнено доизучение массива оптимальным образом.

В случаях, когда количество точек статического и/или динамического зондирования недостаточно, или они полностью отсутствуют, можно рекомендовать проведение вероятностных расчетов осадок с использованием общих инженерно-геологических закономерностей строения массивов.

В центральном регионе европейской части РФ средняя мощность выделяемых ИГЭ и РГЭ состав-

ляет 2–4 м, соответственно вертикальные корреляционные расстояния ориентировочно можно принять 1–2 м. Для насыпных грунтов эти расстояния, как правило, ниже — 0,3–1,0 м. Средние расстояния между скважинами, рекомендуемые нормативными документами на основе огромного опыта изысканий, для II категории сложности инженерно-геологических условий, составляют около 30 м, в связи с чем горизонтальные корреляционные расстояния во флювиогляциальных, озерно-ледниковых и грунтах высоких террас можно ориентировочно принимать 15 м, в моренных грунтах — 20–25 м соответственно, в грунтах пойм рек — 5–10 м, в насыпных грунтах — 3–10 м, в меловых и юрских отложениях — 20–25 м. При этом надо отдавать себе отчет в сниженной точности оценок при использовании подобных закономерностей.

Внедрение современных методов расчетов требует также корректного определения ключевых параметров модели, таких как, например, глубина сжимаемой толщи. Сравнение различных подходов к ее определению показывает, что использование методов, описанных в нормативных документах, может привести к существенным погрешностям в получаемых результатах. Важно продолжать процесс совершенствования нормативной базы и методических рекомендаций для обеспечения достоверности получаемой инженерно-геологической информации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Griffiths D.V. Geotechnical probability: From FOSM to RFEM // 8th International Symposium for Geotechnical Safety & Risk (ISGSR 2022). 2022. Pp. 1–14. DOI: 10.3850/978-981-18-5182-7_00-00-006.xml

2. Mohapatra D., Rahaman O., Kumar J. An Adaptive-Based Finite Element Limit Analysis Approach for Geo-mechanics Problems // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Pp. 1055–1065. DOI: 10.1007/978-981-15-6086-6_85

3. Phoon K.-K. Reliability-based design in Geotechnical Engineering. London and New-York : Taylor & Francis, 2008. DOI: 10.1201/9781482265811

4. Фоменко И.К., Зеркаль О.В., Горлов А.А., Аверин И.В., Шубина Д.Д. Оценка сжимаемой толщи оснований фундаментов при численном моделировании // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 8. С. 65–70. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.08.65-70. EDN ERSYVS.

5. Буянов В.В., Кропоткин М.П., Пригода В.Я. Полевые работы по исследованию грунтов методом электродинамического зондирования // Инженерные изыскания. 2013. № 8. С. 46–53. EDN RCDKCP.

6. Пригода В.Я. Методические рекомендации по производству электродинамического зондирования при инженерно-геологических изысканиях. М. : ЦНИИС, 1980.

7. Asadollahi S.M., Fakher A., Javankhoshdel S. A Case Study of the Measurement of the Spatial Correlation Length of Soil Parameters Using SPT and CPT Field Tests Data // Atlantis Highlights in Engineering. 2023. Pp. 666–678. DOI: 10.2991/978-94-6463-258-3_62

8. Vanmarcke E. Random Fields, Analysis and Synthesis. Cambridge : MIT Press, 1983. 393 p.

9. Baninajarian L., Javankhoshdel S., Bashir R. Probabilistic Analysis of an Embankment Under Extreme Rainfall Events Considering Spatial Variability of Soil Strength Parameters // Atlantis Highlights in Engineering. 2023. Pp. 79–89. DOI: 10.2991/978-94-6463-258-3_8

10. Dastpak P., Sousa R.L., Salles-Najar F., Javankhoshdel S., Dias D. Probabilistic Analysis of a Nailed Wall: Use of the Random Field Theory and Ordered Weighted Averaging Method // International Journal of Geomechanics. 2024. Vol. 24. Issue 12. DOI: 10.1061/ijgnai.gmeng-9887

11. El-Ramly H., Morgenstern N., Cruden D. Probabilistic slope stability analysis for practice // Canadian Geotechnical Journal. 2002. Vol. 39. Issue 3. Pp. 665–683. DOI: 10.1139/t02-034

12. Биндер К., Хеерман Д.В. Моделирование методом Монте-Карло в статистической физике. М. : Физматлит, 1995. 141 с.

13. Жданов Э.Р., Маликов Р.Ф., Хисматуллин Р.К. Компьютерное моделирование физических явлений и процессов методом Монте-Карло. Уфа : БГПУ, 2005. 124 с. EDN VVVBSR.

14. Михайлов Г.А., Войтишек А.В. Численное статистическое моделирование. М. : Академия, 2006. 366 с. EDN QMQLKT.

15. Javankhoshdel S., Cami B., Bathurst R.J., Corum B. Probabilistic analysis of layered slopes with linearly increasing cohesive strength and 2D spatial variability of soil strength parameters using non-circular RLEM approach // IFCEE 2018. 2018. Pp. 113–142. DOI: 10.1061/9780784481585.014

16. Terzaghi K., Peck R., Mesri G. Soil mechanics in engineering practice. 3rd ed. John Wiley and Sons, 1996. 549 p.

17. Krahn J. Stability modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology: First Edition, Revision 1. Calgary, Alberta : GEO-SLOPE International Ltd., 2004. 396 p.

Поступила в редакцию 28 января 2026 г.

Принята в доработанном виде 31 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 31 марта 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Михаил Петрович Кропоткин** — кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры инженерных изысканий и геоэкологии; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; singeos@yandex.ru;

Игорь Константинович Фоменко — доктор геолого-минералогических наук; **Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)**; 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; ifolga@gmail.com;

Андрей Александрович Горлов — аспирант; **Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)**; 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; andrey.gor10@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Griffiths D.V. Geotechnical probability: From FOSM to RFEM. 8th International Symposium for Geotechnical Safety & Risk (ISGSR 2022). 2022; 1-14. DOI: 10.3850/978-981-18-5182-7_00-00-006.xml

2. Mohapatra D., Rahaman O., Kumar J. An Adaptive-Based Finite Element Limit Analysis Approach for Geo-mechanics Problems. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020; 1055-1065. DOI: 10.1007/978-981-15-6086-6_85

3. Phoon K.-K. Reliability-based design in Geotechnical Engineering. London and New-York, Taylor & Francis, 2008. DOI: 10.1201/9781482265811

4. Fomenko I.K., Zerkal O.V., Gorlov A.A., Averin I.V., Shubina D.D. Estimation of the compressible thickness of the foundations in numerical modeling. Industrial and Civil Engineering. 2024; 8:65-70. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.08.65-70. EDN ERSYVS. (rus.).

5. Buyanov V.V., Kropotkin M.P., Prigoda V.Ya. *Fields works for soil investigation by the electrodynamic testing method. Engineering Survey*. 2013; 8:46-53. EDN RCDKCP. (rus.).
6. Prigoda V.Ya. *Methodological Recommendations for Electrodynamic Probing in Engineering Geological Surveys*. Moscow, TsNIIS, 1980. (rus.).
7. Asadollahi S.M., Fakher A., Javankhoshdel S. A Case Study of the Measurement of the Spatial Correlation Length of Soil Parameters Using SPT and CPT Field Tests Data. *Atlantis Highlights in Engineering*. 2023; 666-678. DOI: 10.2991/978-94-6463-258-3_62
8. Vanmarcke E. *Random Fields, Analysis and Synthesis*. Cambridge, MIT Press, 1983; 393.
9. Baninajarian L., Javankhoshdel S., Bashir R. Probabilistic Analysis of an Embankment Under Extreme Rainfall Events Considering Spatial Variability of Soil Strength Parameters. *Atlantis Highlights in Engineering*. 2023; 79-89. DOI: 10.2991/978-94-6463-258-3_8
10. Dastpak P., Sousa R.L., Salles-Najar F., Javankhoshdel S., Dias D. Probabilistic Analysis of a Nailed Wall: Use of the Random Field Theory and Ordered Weighted Averaging Method. *International Journal of Geomechanics*. 2024; 24(12). DOI: 10.1061/ijgnai.gmeng-9887
11. El-Ramly H., Morgenstern N., Cruden D. Probabilistic slope stability analysis for practice. *Canadian Geotechnical Journal*. 2002; 39(3):665-683. DOI: 10.1139/t02-034
12. Binder K., Heerman D.W. *Monte Carlo Simulation in Statistical Physics*. Moscow, Fizmatlit, 1995; 141. (rus.).
13. Zhdanov E.R., Malikov R.F., Khismatullin R.K. *Computer Simulation of Physical Phenomena and Processes by the Monte Carlo Method*. Ufa, BSPU, 2005; 124. EDN VVVBSR. (rus.).
14. Mikhailov G.A., Voitishchek A.V. *Numerical Statistical Modeling*. Moscow, Academy, 2006; 368. EDN QMQLKT. (rus.).
15. Javankhoshdel S., Cami B., Bathurst R.J., Corum B. Probabilistic analysis of layered slopes with linearly increasing cohesive strength and 2D spatial variability of soil strength parameters using non-circular RLEM approach. *IFCEE 2018*. 2018; 113-142. DOI: 10.1061/9780784481585.014
16. Terzaghi K., Peck R.B., Mesri G. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd ed. John Wiley and Sons, 1996; 549.
17. Krahn J. Stability modeling with SLOPE/W. *An Engineering Methodology: First Edition, Revision 1*. Calgary, Alberta, GEO-SLOPE International Ltd., 2004; 396.

Received January 28, 2026.

Adopted in revised form on March 31, 2026.

Approved for publication on March 31, 2026.

B I O N O T E S: **Mikhail P. Kropotkin** — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Surveys and Geoecology; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; singeos@yandex.ru;

Igor K. Fomenko — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; **Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI)**; 23 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117997, Russian Federation; ifolga@gmail.com;

Andrey A. Gorlov — postgraduate student; **Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI)**; 23 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117997, Russian Federation; andrey.gor10@yandex.ru.

Author contributions: all authors have contributed equally to the preparation of this publication.

The authors declare no conflict of interest.

Сравнение напряженно-деформированного состояния комбинированной арочной конструкции при различных условиях опирания

Александр Майорович Ибрагимов¹, Надежда Юрьевна Трянина²,
Вера Витальевна Долгушева¹, Тимофей Владимирович Долгушев³

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

² Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ);
г. Нижний Новгород, Россия;

³ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В комбинированных арочных системах опоры часто выполняют шарнирными для исключения передачи момента на нижележащие конструкции. Среди шарнирных опор для арочных комбинированных систем рассматривают либо шарнирно-неподвижные опоры с обеих сторон, либо шарнирно-подвижную с одной стороны и нижнюю затяжку для восприятия распора. Рассмотрены преимущества и особенности применения обоих вариантов опор на примере анализа напряженно-деформированного состояния арки с лучевыми затяжками.

Материалы и методы. Сравнение проведено с помощью предварительного теоретического исследования и последующих численных расчетов. Расчетные модели реализованы в программном конечно-элементном комплексе SCAD с учетом геометрически нелинейного характера работы конструкции. Подбор усилий натяжения в затяжках выполнен по ранее опубликованному алгоритму.

Результаты. На основе анализа проведенных исследований и численных расчетов определены напряжения и перемещения в сечениях арки, а также установлены силы предварительного напряжения в стяжках для достижения минимального расхода металла. Наглядно продемонстрировано влияние шарнирной и жесткой опоры с одной стороны арки на напряжения, деформации и расход металла.

Выводы. По результатам сравнения комбинированной арочной системы с двумя неподвижными шарнирными опорами и арочной системы с одной шарнирно-подвижной опорой и нижней затяжкой выявлено, что в арке с подвижной опорой горизонтальные и вертикальные перемещения пояса арки выше. После подбора и перераспределения усилий преднапряжения в затяжках возникающие продольные и поперечные усилия в поясах обеих арок сопоставимы, однако изгибающий момент в арке с подвижной опорой вдвое меньше. По металлоемкости пояса обе арки имеют практически одинаковый расход стали, а по металлоемкости материала на затяжки в арке с подвижной опорой требуется в полтора раза больше количества материала на затяжки, так как необходимо больше усилия натяжения затяжек. Если нижняя затяжка отсутствует, если распор от арки воспринимается другими опорными конструкциями, то целесообразно использовать арки с неподвижными опорами. В случае отсутствия такой возможности следует применять арку с нижней затяжкой и с одной подвижной опорой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: комбинированные конструкции, стальная арка с лучевыми затяжками, преднапряжение, шарнирно-неподвижная опора, шарнирно-подвижная опора, арочно-вантовая система, геометрическая нелинейность, SCAD, моделирование вант

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ибрагимов А.М., Трянина Н.Ю., Долгушева В.В., Долгушев Т.В. Сравнение напряженно-деформированного состояния комбинированной арочной конструкции при различных условиях опирания // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 7. С. 1114–1124. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1114-1124

Автор, ответственный за переписку: Вера Витальевна Долгушева, DolgushevaVV@yandex.ru.

Comparison of the stress-strain state of a combined arch structure under different support conditions

Alexander M. Ibragimov¹, Nadezhda Yu. Tryanina², Vera V. Dolgusheva¹,
Timofey V. Dolgushev³

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

² *Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNSAGU); Nizhny Novgorod, Russian Federation;*

³ *Bauman Moscow State Technical University (BMSTU); Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. In combined arch systems, supports are often hinged to prevent moment transmission to underlying structures. For combined arch systems, support options include either hinged supports on both sides, or hinged supports on one side with a lower tie to support thrust. This paper analyzes the advantages and specific features of both support options using the stress-strain analysis of an arch with radial ties.

Materials and methods. The comparison was conducted using a preliminary theoretical study and subsequent numerical calculations. The calculation models were implemented in the SCAD finite element software package, taking into account the geometrically nonlinear nature of the structure's operation. Tension forces in the tie rods were selected using a previously published algorithm.

Results. Based on the results of experimental studies and numerical calculations, stresses and displacements in arch sections were obtained. The movements of the circuit, graphs of correspondence between experimental data and calculation results are shown. Directions for improving experimental models of such combined systems with ties are analyzed.

Conclusions. A comparison of a combined arch system with two fixed hinged supports and an arch system with a single hinged movable support and a lower tie revealed that the horizontal and vertical displacements of the arch chord are several times greater in the arch with a movable support. After selecting and redistributing the prestressing forces in the ties, the resulting longitudinal and transverse forces in the chords of both arches are comparable, but the bending moment in the arch with a movable support is half as strong. In terms of the required metal content for the chord, both arches require virtually the same amount of steel. However, in terms of the required metal content for the tie rods, the arch with a movable support requires one and a half times more material, as greater tensioning force is required for the tie rods. If there is no bottom tie rod, and the arch thrust is supported by other supporting structures, it is advisable to use arches with fixed supports. If this is not possible, an arch with a bottom tie rod and one movable support should be used.

KEYWORDS: combined structures, steel arch with radial ties, prestressing, hinged-fixed support, hinged-sliding support, cable roof system supported by arches, geometrical nonlinearity, SCAD, cable stay modelling

FOR CITATION: Ibragimov A.M., Tryanina N.Yu., Dolgusheva V.V., Dolgushev T.V. Comparison of the stress-strain state of a combined arch structure under different support conditions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(7):1114-1124. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1114-1124 (rus.).

Corresponding author: Vera V. Dolgusheva, DolgushevaVV@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

По статической работе арки подразделяют на трехшарнирные, двухшарнирные и бесшарнирные [1–5]. Преимущества первой группы арок в том, что они не чувствительны к температурным изменениям и перемещениям опор, особенности — такие арки более деформативны и имеют повышенный расход материала по сравнению с другими системами [6]. Двухшарнирные являются самыми распространенными из-за простоты монтажа и изготовления. В них проявлены в меньшей степени недостатки трехшарнирной и бесшарнирной системы. В бесшарнирных арках более равномерно распределяются изгибающие моменты, они обладают наибольшей жесткостью, но требуется устройство более габаритных, более сложных опор.

В комбинированных системах, в том числе в арочно-вантовых, в которых реализована совместная работа растянутых затяжек с сжато-изогнутым поясом арки, в качестве опор часто применяются либо шарнирно-неподвижные опоры, либо одна опора шарнирно-неподвижная, а другая — подвижная (автовокзал в Куре [7], светопрозрачные покрытия галерей торговых центров «ГУМ», «Петровский Пассаж» [8] и «Гостиный двор» [9] в Москве, конькобежный центр «Уральская молния» в Челябинске и футбольный легкоатлетический манеж в Казани [9],

музей истории Гамбурга в Гамбурге¹, стадион «Уэмбли» в Лондоне [10, 11] и др.). В случае с одной подвижной опорой для восприятия распорного усилия вводят нижнюю затяжку между опорами. Преимущества шарнирно-неподвижных опор с обеих сторон в том, что они позволяют легче задавать, контролировать и поддерживать усилие натяжения в лучевых затяжках, однако при таком решении необходимо, чтобы нижележащие конструкции были способны воспринять передаваемое покрытием усилие распора. Область применения арок с лучевыми затяжками — покрытия протяженных в плане зданий и сооружений (выставочные залы, торговые галереи, покрытия вокзалов и др. [12]). Чаще всего усилия от распора покрытия в таких зданиях воспринимают массивные пилоны или контрфорсы, расположенные в плоскости арки (светопрозрачные покрытия галерей торговых центров «ГУМ» и «Петровский Пассаж» в г. Москве [8] и др.). Когда нижележащие конструкции представляют собой колонны или стены, не предназначенные для восприятия большого распорного усилия, требуется создание шарнирно-подвижной опоры с одной стороны конструкции и введение нижней затяжки, в таком случае исключается

¹ Museum of Hamburg History, Glass Roof // gmp. Germany : Hamburg, 1989. URL: <https://www.gmp.de/en/projects/410/museum-of-hamburg-history-glass-roof>

передача распорного усилия на нижележащие конструкции, его воспринимает затяжка.

В статьях [13–15] представлен теоретический и экспериментальный анализ работы арочных конструкций с гибкими решетками, в том числе на примере арок с веерными и лучевыми затяжками при различном соотношении стрелы подъема к пролету. Рассматриваются шарнирные опоры: шарнирно-неподвижная с левой стороны, шарнирно-подвижная — с правой. В докладе [16] и статье [17] более подробно исследуется напряженно-деформированное состояние двухшарнирной арки с веерными затяжками, проведен анализ работы конструкции, когда обе опоры шарнирно-неподвижные и когда одна из опор — шарнирно-подвижная. Также ряд публикаций авторов настоящей статьи посвящен теоретическому, численному и экспериментальному исследованию арок с лучевыми и веерными затяжками.

Как работает арка с лучевыми затяжками с шарнирно-неподвижными опорами и при наличии одной подвижной опоры и нижней затяжки, какое из двух решений опор для арки с лучевыми затяжками способствует возникновению наименьших усилий и перемещений в поясе арки, при каком решении опор требуется наименьшее усилие натяжения в затяжках, при каких опорах достигается наименьшая металлоемкость конструкции? Ответы на поставленные вопросы получены по результатам сравнительных расчетов, описанных в данной статье.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сравнение работы арок кругового полигонального очертания с восьмью панелями и затяжками выполнено с использованием метода конечных элементов в программном комплексе SCAD. Восемь панелей и затяжек принято по ранее проведенным исследованиям, связанным с рационализацией по металлоемкости покрытия из арок с лучевыми затяжками [18, 19]. В первой схеме (рис. 1, а) обе опоры шарнирно-неподвижные, во второй (рис. 1, б) — правая опора шарнирно-подвижная и добавлена нижняя затяжка.

Сравнение двух схем арок с лучевыми затяжками, оценка влияния нижней затяжки и шарнирно-подвижной опоры на усилия, возникающие в конструкции,

и на металлоемкость осуществлено для следующих условий:

- рассмотрены арки с лучевыми затяжками пролетом 30 м, стрела подъема арки с лучевыми затяжками принята как четверть пролета [19] и составляет 7,5 м;
- плоская постановка задачи (шесть степеней свободы в узле, однако в каждом узле пояса арки введено ограничение линейных перемещений из плоскости);
- усилия предварительного натяжения приняты по результатам, представленным в статье [19]: 55, 45, 30, 40 кН от верхних до нижних затяжек соответственно;
- нагрузка от покрытия принята равной $100 \text{ кг/м}^2 = 0,981 \text{ кН/м}^2$, с учетом шага арок 6 м нагрузка приложена равномерно распределенной на пояс арки и составляет $600 \text{ кг/м} = 5,886 \text{ кН/м}$;
- снеговая нагрузка принята по третьему снеговому району СП 20.13330.2016²;
- расчеты проведены для двух расчетных сочетаний (рис. 2);
- пояс арок замоделирован с помощью конечного элемента (КЭ) 310 (пространственный геометрически нелинейный стержень), сечение принято по ГОСТ 30245³, а затяжки — с помощью КЭ 308 (вантовый элемент), сечение принято по ГОСТ 3064⁴.

При расчете снеговой нагрузки (12,6 кН/м) коэффициент учета снега c_e принят равным 1 в запас расчета, термический коэффициент c_t принят равным 1 из предположения, что таяния снега не происходит, коэффициент формы μ принят равным единице, несмотря на неравномерность распределения. Такое упрощение допустимо для сравнительного расчета и не вносит серьезных искажений в результаты.

В первом расчетном сочетании (РСН 1) рассматривается совместное действие собственного веса, веса покрытия и равномерно распределенной на-

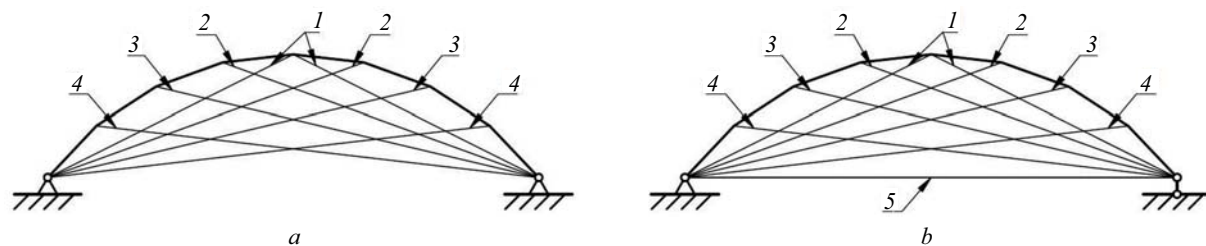


Рис. 1. Сравнимые схемы и нумерация групп затяжек: а — схема № 1; б — схема № 2; цифрами обозначены номера групп затяжек

Fig. 1. Comparable diagrams and numbering of tie groups: а — scheme No. 1; б — scheme No. 2; Numbers indicate the tie groups

² СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318>

³ ГОСТ 30245–2012. Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия. 2014. 42 с.

⁴ ГОСТ 3064–80. Канат одинарной свивки типа ТК конструкции $1 \times 37 (1 + 6 + 12 + 18)$. 2014. 11 с.

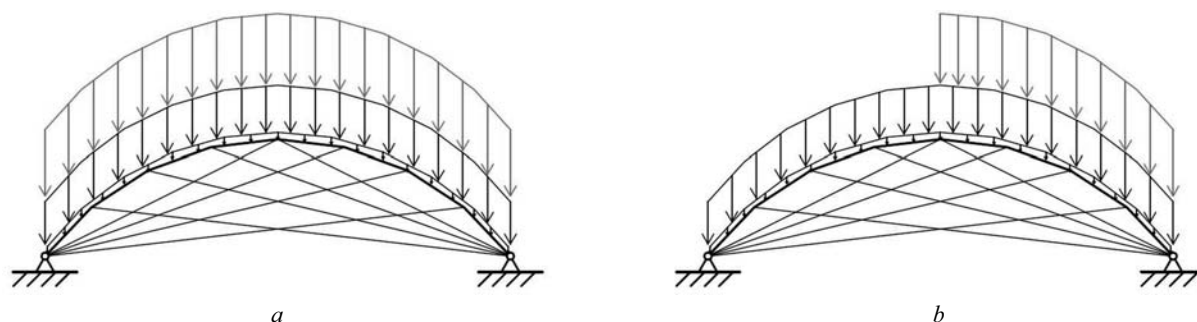


Рис. 2. Рассматриваемые расчетные сочетания нагрузок (РСН): *a* — РСН 1; *b* — РСН 2

Fig. 2. The considered design load combinations (DLC): *a* — DLC 1; *b* — DLC 2

грузки на всем пролете. Второе сочетание (РСН 2) отличается от первого только снеговой нагрузкой, распределенной на половине пролета (рис. 2). В расчетных сочетаниях не учитывается неравномерность распределения снега на арочном покрытии, представленная в СП 20.13330.2016¹, так как она незначительно влияет на изменение результатов в рамках поставленных задач.

Сопоставление работы арок с лучевыми затяжками проведено в два этапа. В первичном расчете для оценки влияния нижней затяжки и шарнирно-подвижной опоры во второй схеме нижней затяжке было задано малое значение преднапряжения (0,01 кН). Подбор усилий преднапряжения в затяжках, их сечения и сечения пояса арки не производился на первом этапе расчета, однако выполнен на втором этапе расчета по алгоритму, описанному в статье [19].

Для анализа смещений шарнирно-подвижной опоры при работе без снеговой нагрузки и вместе с ней было сформировано дополнительное сочетание (РСН 3), включающее совместное действие собственного веса и веса покрытия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 1 представлены результаты расчета первого этапа (когда нижней затяжке во второй схеме задано малое значение преднапряжения). Заданное затяжкам преднапряжение показано на рис. 3.

По результатам предварительного расчета (первого этапа) выявлено, что в арке с шарнирно-подвижной опорой и с нижней не преднапряженной затяжкой горизонтальные перемещения пояса арки больше, чем в арке с шарнирно-неподвижными опорами приблизительно в 5–10 раз, вертикальные пере-

мещения больше в 3–6 раз, максимальное значение продольной силы увеличивается в 1,3–1,7 раз, а изгибающий момент в 1–4,5 раза. Поперечная сила увеличивается в 1,1–1,3 раза. Максимальное усилие натяжения в затяжках увеличивается в 2,1–3 раза.

По характеру эпюры изгибающих моментов (рис. 4) видно, что для арки с подвижной опорой необходимо распределить преднапряжение в затяжках так, чтобы уменьшить изгибающий момент в четверти пролета (т.е. за счет преднапряжения первой (центральной) группы затяжек, ослабления преднапряжения в четвертой (нижней) группе затяжек (рис. 1) и за счет задания преднапряжения нижней затяжке).

Эпюры продольных сил (рис. 5) показывают, что в арке с шарнирно-неподвижными опорами наибольшее сжимающее продольное усилие возникает в приопорных зонах, а в арке с одной шарнирно-подвижной опорой — в середине пролета при РСН 1 (рис. 5, *b* с равномерным распределением снеговой нагрузки на всем пролете) и в середине, и в приопорной зоне при РСН 2 (рис. 5, *d* с равномерным распределением снеговой нагрузки на половине пролета).

В табл. 2 представлены результаты расчета второго этапа (после подбора усилий натяжения в затяжках арок, при которых достигается наименьшая металлоемкость, после подбора сечения пояса арки и затяжек). Обозначения в табл. 2 соответствуют обозначениям в табл. 1.

Подобранные усилия натяжения в затяжках представлены на рис. 6.

На рис. 7–9 показаны эпюры изгибающих моментов, продольных сил и деформированные схемы, полученные по результатам расчетов второго этапа.

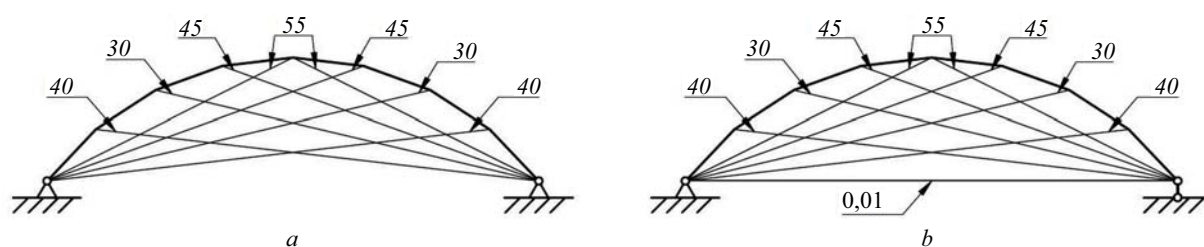


Рис. 3. Заданное усилие преднапряжения в затяжках, кН: *a* — схема № 1; *b* — схема № 2

Fig. 3. Specified prestressing force in ties, kN: *a* — scheme No. 1; *b* — scheme No. 2

Табл. 1. Результат расчета двух схем на первом этапе

Table 1. The result of the calculation of two schemes in the first stage

Расчетное сочетание нагрузок Design load combination (DLC)	PCH 1 DLC 1		PCH 2 DLC 2		PCH 3 DLC 3
Номер схемы (рис. 1) Scheme number (Fig. 1)	1	2	1	2	2
$x_{\max}$ пояса арки, мм $x_{\max}$ arch belt, mm	19,53	192,25	25,26	135,63	60,96
$x_{\max}$ правой опоры, мм $x_{\max}$ right support, mm	–	379,06	–	239,97	113,67
$z_{\max}$, мм / mm	–43,45	–244,48	–52,86	–174,97	–66,99
$N_{\max 1}$, кН / kN	–421,00	–702,29	–388,84	–499,11	–220,8
$M_{\max}$, кН·м / kN·m	23,57	105,95	34,3	60,65	24,26
	–49,03	–58,62	–45,47	–43,3	–15,8
$Q_{\max}$, кН / kN	39,61	49,83	42,36	46,78	15,29
	–43,51	–58,49	–42,86	–49,22	–16,77
$N_{\max 2}$, кН / kN	55,26	163,68	67,34	141,34	84,64
$R_{xл}$, кН / R_{xleft} , kN	282,54	0	190,25	0	0
$R_{zл}$, кН / R_{zleft} , kN	328,94	328,94	278,08	277,2	110,36
$R_{xп}$, кН / R_{xright} , kN	–282,54	–	–190,25	–	–
$R_{zп}$, кН / R_{zright} , kN	328,94	328,94	161,22	162,1	110,36

Примечание: $x_{\max}$ — максимальное горизонтальное перемещение; $z_{\max}$ — максимальное вертикальное перемещение; $N_{\max 1}$ и $N_{\max 2}$ — максимальное продольное усилие в поясе арки и в затяжках соответственно; $M_{\max}$ — максимальное значение изгибающего момента в поясе арки; $Q_{\max}$ — максимальное поперечное усилие в поясе арки; $R_{xл}$, $R_{zл}$, $R_{xп}$, $R_{zп}$ — опорная реакция горизонтальная (x) и вертикальная (z) в правой (п) и левой (л) опорах соответственно.

Note: $x_{\max}$ is the maximum horizontal displacement; $z_{\max}$ is the maximum vertical displacement; $N_{\max 1}$ and $N_{\max 2}$ are the maximum axial forces in the arch chord and ties, respectively; $M_{\max}$ is the maximum bending moment in the arch chord; $Q_{\max}$ is the maximum shear force in the arch chord; R_{xleft} , R_{zleft} , R_{xright} , R_{zright} are the horizontal (x) and vertical (z) support reactions at the left and right supports, respectively.

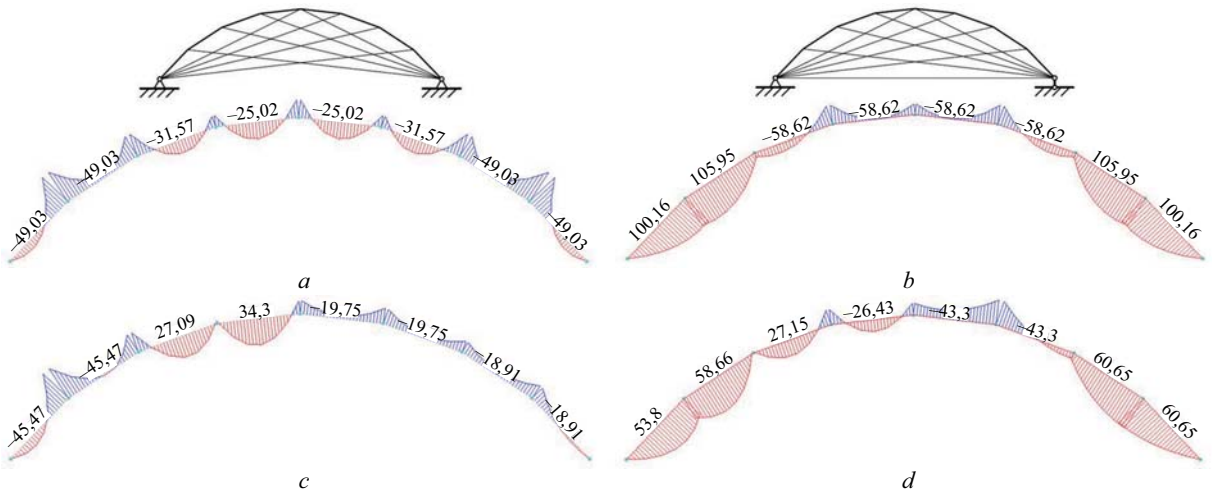


Рис. 4. Эпюры изгибающих моментов M , кН·м, при PCH 1 (a, b) и PCH 2 (c, d): a, c — для арки без нижней затяжки; b, d — для арки с нижней затяжкой

Fig. 4. Bending moment diagrams M , kN·m, at DLC 1 (a, b) and DLC 2 (c, d): a, c — for an arch without lower tie; b, d — for an arch with lower tie

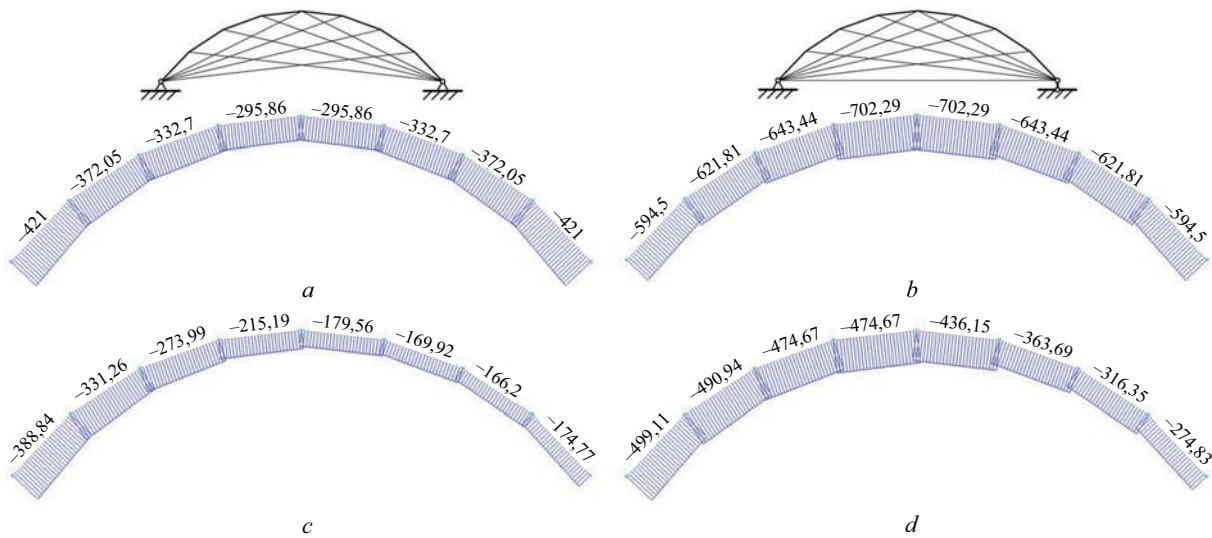


Рис. 5. Эпюры продольных сил N , кН, при РСН 1 (а, b) и РСН 2 (с, d): а, с — для арки без нижней затяжки; b, d — для арки с нижней затяжкой

Fig. 5. Diagrams of longitudinal forces N , kN, at DLC 1 (a, b) and DLC 2 (c, d): a, c — for an arch without lower tie; b, d — for an arch with lower tie

Табл. 2. Результат расчета двух схем на втором этапе

Table 2. The result of the calculation of two schemes in the second stage

Расчетное сочетание нагрузок Design load combination (DLC)	PCH 1 DLC 1		PCH 2 DLC 2		PCH 3 DLC 3
Обозначение схемы (рис. 1) Scheme designation (Fig. 1)	1	2	1	2	2
$x_{\max}$ пояса арки, мм $x_{\max}$ arch belt, mm	18,49	61,68	25,47	51,22	20,82
$x_{\max}$ правой опоры, мм $x_{\max}$ right support, mm	—	90,48	—	60,38	30,19
$z_{\max}$, мм / mm	−40,87	−72,69	−48,87	−75,10	−24,47
$N_{\max 1}$, кН / kN	−425,44	−466,66	−392,28	−419,51	−156,95
$M_{\max}$, кН·м / kN·m	25,48	21,63	36,4	32,84	7,17
	−51,79	−25,2	−47,05	−26,81	−8,35
$Q_{\max}$, кН / kN	40,5	40,65	43,2	40,76	13,86
	−43,37	−41,4	−43,33	−41,71	−13,91
$N_{\max 2}$, кН / kN	54,47	63,38 для наклонных затяжек и 276,67 для нижней 63.38 for inclined ties and 276.67 for the bottom	67,19	85,75 для наклонных затяжек и 206,27 для нижней 85.75 for inclined ties and 206.27 for the bottom	53,01 для наклонных затяжек и 135,63 для нижней 53.01 for inclined ties and 135.63 for the bottom
Подобранное сечение пояса арки, мм Selected section of the arch belt, mm	Ø14	Ø14 для наклонных затяжек и Ø27 для нижней Ø14 for inclined ties and Ø27 for the bottom	Ø14	Ø14 для наклонных затяжек и Ø27 для нижней Ø14 for inclined ties and Ø27 for the bottom	Ø14 для наклонных затяжек и Ø27 для нижней Ø14 for inclined ties and Ø27 for the bottom

Расчетное сочетание нагрузок Design load combination (DLC)	PCH 1 DLC 1		PCH 2 DLC 2		PCH 3 DLC 3
Обозначение схемы (рис. 1) Scheme designation (Fig. 1)	1	2	1	2	2
Подобранное сечение затяжек, мм Selected cross-section of ties, mm	200 × 9,5	200 × 9,5	200 × 9,5	200 × 9,5	200 × 9,5
Вес арочного пояса, т Weight of arched belt, t	1,888	1,888	1,888	1,888	1,888
Вес затяжек, т Weight of ties, t	0,163	0,262	0,163	0,262	0,262
Вес всей конструкции, т Weight of the entire structure, t	1,961	2,150	1,961	2,150	2,150
$R_{xn}, \text{кН} / R_{xleft}, \text{кН}$	284,34	0	191,89	0	0
$R_{zn}, \text{кН} / R_{zleft}, \text{кН}$	330,83	330,83	279,97	279,73	112,25
$R_{xn}, \text{кН} / R_{xright}, \text{кН}$	-284,34	—	-191,89	—	—
$R_{zn}, \text{кН} / R_{zright}, \text{кН}$	330,83	330,83	163,1	163,34	112,25

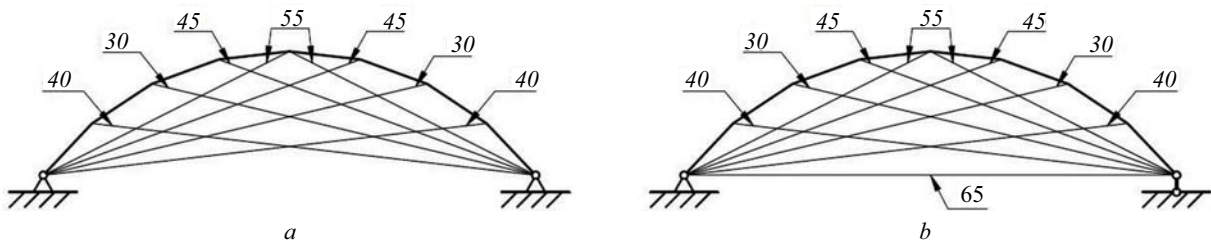


Рис. 6. Заданное усилие преднапряжения в затяжках, кН: а — схема № 1; б — схема № 2
Fig. 6. Specified prestressing force in ties, kN: a — scheme No. 1; b — scheme No. 2

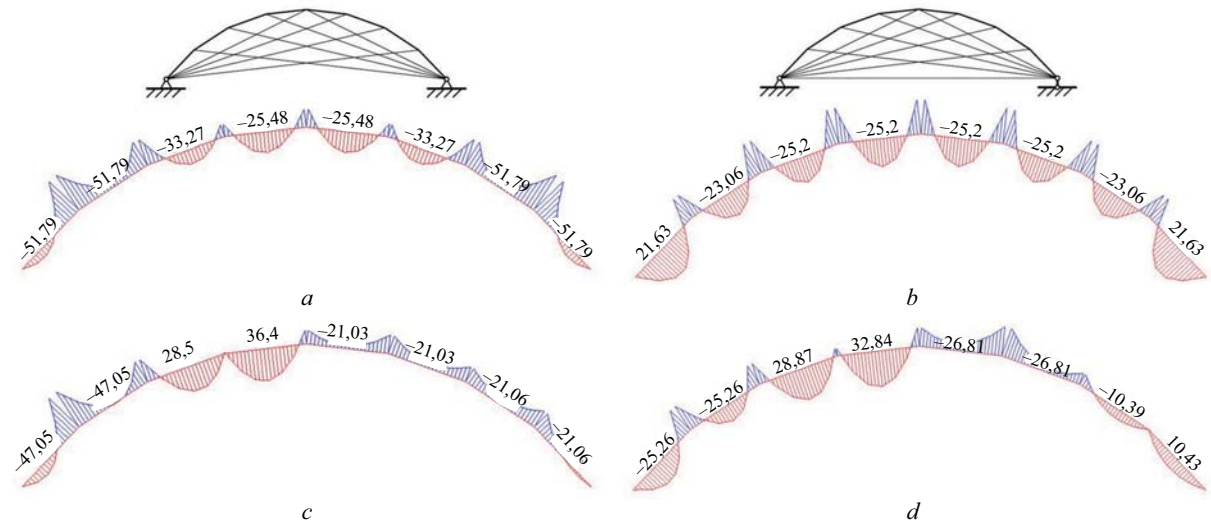


Рис. 7. Эпюры изгибающих моментов M , кН·м, при РСН 1 (а, б) и РСН 2 (с, д): а, с — для арки без нижней затяжки; б, д — для арки с нижней затяжкой
Fig. 7. Bending moment diagrams M , kN·m, at DLC 1 (a, b) and DLC 2 (c, d): a, c — for an arch without lower tie; b, d — for an arch with lower tie

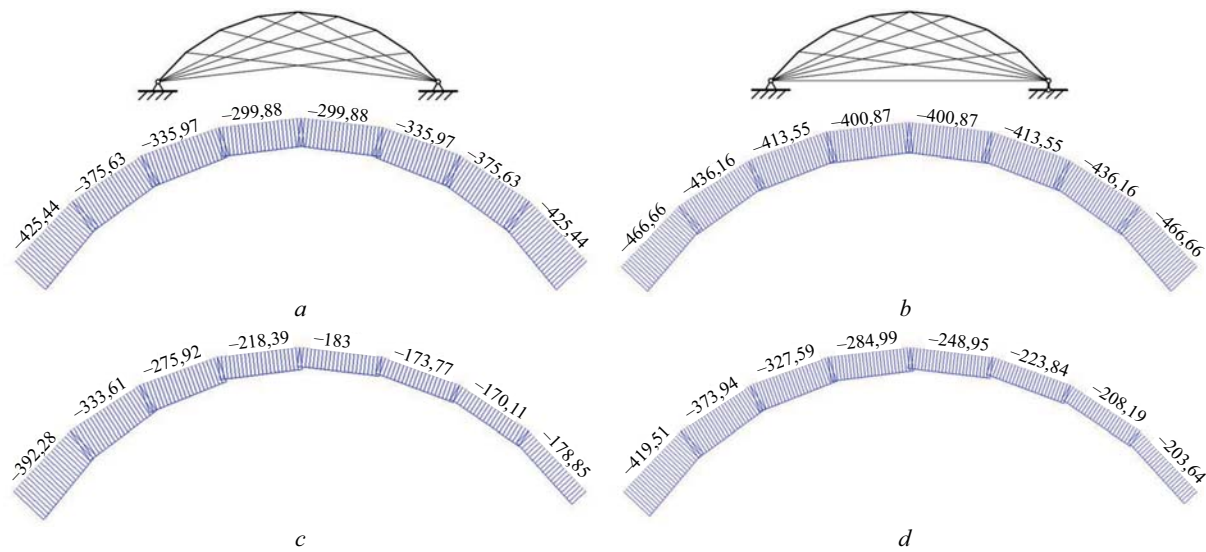


Рис. 8. Эпюры продольных сил N , кН, при РСН 1 (а, б) и РСН 2 (с, д): а, с — для арки без нижней затяжки; б, д — для арки с нижней затяжкой

Fig. 8. Diagrams of longitudinal forces N , kN, at DLC 1 (а, б) and DLC 2 (с, д): а, с — for an arch without lower tie; б, д — for an arch with lower tie

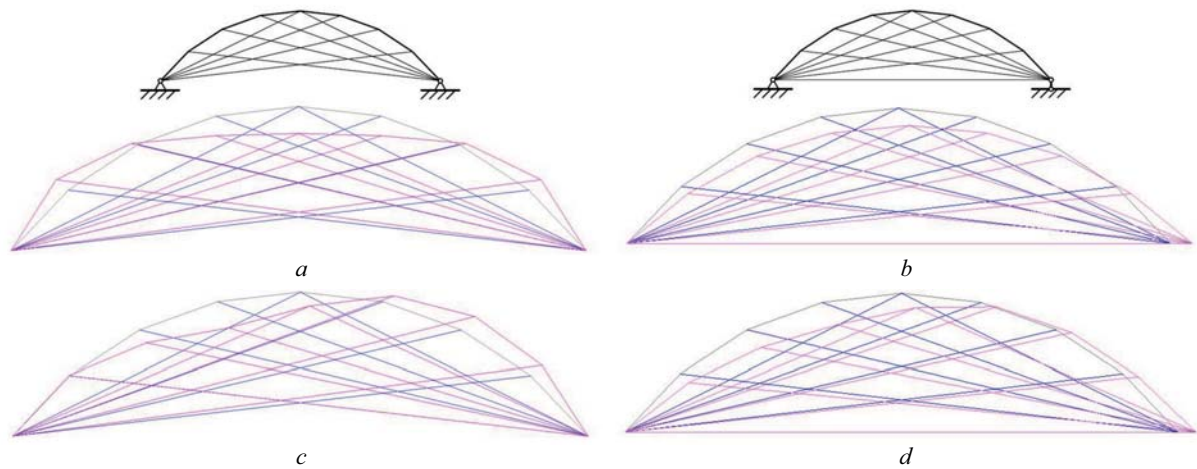


Рис. 9. Схемы деформирования при РСН 1 (а, б) и РСН 2 (с, д): а, с — для арки без нижней затяжки; б, д — для арки с нижней затяжкой. Синим цветом показано очертание модели до нагружения, фиолетовым цветом — после нагружения

Fig. 9. Deformation schemes at DLC 1 (а, б) and DLC 2 (с, д): а, с — for an arch without lower tie; б, д — for an arch with lower tie

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам сравнения двух арок систем выявлено, что в арке с одной шарнирно-подвижной опорой горизонтальные перемещения пояса арки выше в 2–3,3 раза, а вертикальные перемещения в 1,5–1,8 раз, чем в арке с шарнирно-неподвижными опорами. После перераспределения усилий преднапряжения в затяжках возникающие продольные и поперечные усилия в поясах обеих арок сопоставимы и отличаются незначительно, однако изгибающий момент в арке с подвижной опорой вдвое меньше, чем в арке с неподвижными опорами. По метал-

лоемкости пояса обе арки сопоставимы, а по металлоемкости затяжек арка с подвижной опорой требует в 1,6 раз большего количества материала, чем арка с неподвижными опорами. При этом в арке с одной подвижной опорой необходимо задание большего усилия преднапряжения в затяжках, чем в арке с шарнирно-неподвижными опорами.

Рассматриваемая арка с подвижной опорой позволяет уменьшить поперечное сечение до значения 200 × 8, однако при таком уменьшении требуется увеличение сечения нижней затяжки. Согласно ГОСТ 3068–80 на стальные канаты максимальный размер составляет Ø27 мм, поэтому сечение пояса арки было

принято таким, при котором в затяжке максимальное продольное усилие не превышает предельно допустимое значение для выбранного типоразмера затяжки.

Таким образом, если конструкция опирается на опоры, которые способны воспринимать распор (поперечные стены, пилоны и другие массивные кон-

струкции), то целесообразно с точки зрения монтажа и задания преднапряжения затяжкам использовать арки с неподвижными опорами. В случае отсутствия возможности восприятия распора нижележащими конструкциями следует применять арку с нижней затяжкой и с подвижной опорой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Долгополов В.Е., Гринев Д.Д. Классификация и технологическая эффективность арочных конструкций // Научные труды КубГТУ. 2026. № 1. С. 67–78. DOI: 10.26297/2312-9409.2026.1.5. EDN MLSZZJ.

2. Ситников И.Р., Голиков А.В. Регулирование усилий в болшепролетных конструкциях при разработке рациональной конструктивной формы здания дельфинария в Волгограде // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 4. С. 278–292. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-278-292. EDN XXRMGL.

3. Лебедева Н.В. Фермы, арки, тонкостенные пространственные конструкции. М. : Архитектура-С, 2006. EDN QNMBCF.

4. Crocetti R. Timber Structures for Large-Span Structures // Proceedings of the World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'16). 2016. DOI: 10.11159/icseem16.124

5. Karnovsky I.A. Theory of Arched Structures. London : Springer New York, 2012. 429 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-0469-9

6. Инженерные конструкции / под ред. Ермолова В.В. М. : Высшая школа, 1991. 408 с.

7. Burford N.K., Smith F.W., Gengnagel C. The Evolution of Arches as Lightweight Structures A History of Empiricism and Science // Proceedings of the Third International Congress on Construction History. 2009. Pp. 267–274.

8. Грефе Р., Перчи О., Шухов Ф., Щербо Г., Гаппов М., Беленя Е. и др. В.Г. Шухов (1853–1939). Искусство конструкции. М. : Мир, 1994. 192 с. EDN UHDMZ.

9. Киселев Д.Б. Арочно-вантовые комбинированные конструкции. Численные и экспериментальные исследования // Современное промышленное и гражданское строительство. 2006. Т. 2. № 1. С. 17–27. EDN LALAXJ.

10. Кривошапко С.Н. Вантовые структуры // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 1. С. 9–22. EDN VCHTHN.

11. Сыч С. Проектирование вантовых конструкций в Autodesk Robot Structural Analysis Professional // CADmaster. 2012. № 6. С. 84–86.

12. Коряков А.С., Евстафьева Е.Б. Современное состояние светопрозрачных конструкций Шухова // Вестник МГСУ. 2013. № 12. С. 84–92. EDN RQAWIB.

13. Кожевников Е.Н. Предварительно напряженные фермы с жестким криволинейным верхним поясом и решеткой из гибких элементов // Труды III Междунар. конф. по предварительно напряженным металлическим конструкциям. 1971. С. 141–155.

14. Сингаевский П.М., Кожевников К.М., Караджичи К.М. К определению оптимальной геометрической схемы некоторых комбинированных арочных ферм с гибкой решеткой // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. 1971. № 4. С. 14–18.

15. Синицин Ю.Н. О конструктивных схемах и особенностях работы некоторых стальных стропильных ферм комбинированной системы // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. 1964. № 2. С. 33–41.

16. Королева Е.Ю., Трянина Н.Ю. Напряженно-деформированное состояние двухшарнирной арки с системой сходящихся затяжек // XIII Всеросс. фестиваль науки : сб. тез. 2023. С. 89–90. EDN MQRRUQ.

17. Королева Е.Ю., Трянина Н.Ю. Исследование работы сетчатого арочного свода с системой сходящихся затяжек // Междунар. конф. Нижегородского фестиваля науки : сб. тез. докл. 2025. С. 104–105. EDN WFPOWA.

18. Dolgusheva V.V., Ibragimov A.M. Comparing two types of combined arch-cable systems operation // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2791. P. 030021. DOI: 10.1063/5.0143530

19. Долгушева В.В., Ибрагимов А.М., Долгушев Т.В. Рациональное конструктивное решение комбинированной арочной системы с наклонными тягами // Academia. Архитектура и строительство. 2023. № 2. С. 168–174. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-2-168-174. EDN GCKCKR.

Поступила в редакцию 2 марта 2026 г.

Принята в доработанном виде 20 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 30 марта 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Майорович Ибрагимов — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 704948, Scopus: 57189524528, ResearcherID: AFN-6830-2022; ORCID: 0000-0003-3761-9213; igasu_alex@mail.ru;

Надежда Юрьевна Трянина — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры теории сооружений и технической механики; **Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ);** 603000 г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65; РИНЦ ID: 454862, ORCID: 0009-0008-3845-3917; nadial2005@mail.ru;

Вера Витальевна Долгушева — кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1061655, Scopus: 57212309767, ORCID: 0000-0002-8530-9546; DolgushevaVV@yandex.ru;

Тимофей Владимирович Долгушев — кандидат технических наук, доцент, кафедра ИУ7 программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии; **Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана);** 125009, г. Москва, Тверская ул., д. 11, стр. 1,4; РИНЦ ID: 1061498, Scopus: 57218657350, ResearcherID: AFX-6017-2022, ORCID: 0000-0002-0306-8890; dolgushew@yandex.ru.

Вклад авторов:

Ибрагимов А.М. — научное руководство, анализ и интерпретация полученных данных, критический пересмотр черновика рукописи.

Трянина Н.Ю. — научное руководство, формулирование идеи, ключевых целей и задач, анализ и интерпретация полученных данных, критический пересмотр черновика рукописи.

Долгушева В.В. — развитие ключевых целей и задач, проведение исследований, составление черновика рукописи, разработка методологии, создание моделей.

Долгушев Т.В. — развитие ключевых целей и задач, проведение исследований, составление черновика рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Dolgoplov V.E., Grinev D.D. Classification and technological efficiency of arched structures. *Scientific Works of KubSTU*. 2026; 1:67-78. DOI: 10.26297/2312-9409.2026.1.5. EDN MLSZJZJ. (rus.).
2. Sitnikov I.R., Golikov A.V. Adjustment of forces in large-span structures in the design of a rational constructive form of a dolphinarium in Volgograd. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2018; 14(4):278-292. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-278-292. EDN XXRMGL. (rus.).
3. Lebedeva N.V. *Trusses, arches, thin-walled spatial structures*. Moscow, Architecture-S, 2006. EDN QNMBCF. (rus.).
4. Crocetti R. Timber Structures for Large-Span Structures. *Proceedings of the World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'16)*. 2016. DOI: 10.11159/icsenm16.124
5. Karnovsky I.A. *Theory of Arched Structures*. London, Springer New York, 2012; 429. DOI: 10.1007/978-1-4614-0469-9
6. *Engineering structures* / Ed. by V.V. Ermolov. Moscow, Higher School, 1991; 408. (rus.).
7. Burford N.K., Smith F.W., Gengnagel C. The Evolution of Arches as Lightweight Structures a History of Empiricism and Science. *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*. 2009; 267-274.
8. Graefe R., Pertschi O., Shukhov F., Shcherbo G., Gappoev M., Belenya E. et al. V.G. Shukhov (1853–1939). *The Art of Construction*. Moscow, Mir, 1994; 192. EDN UHDMZ.
9. Kiselev D.B. Combined (hybrid) arch-cable structures. Numeric and experimental researches. *Modern Industrial and Civil Construction*. 2006; 2(1):17-27. EDN LALAXJ. (rus.).
10. Krivoshapko S.N. Cable-stayed structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2016; 1:9-22. EDN VCHTHN. (rus.).
11. Sych S. Design of cable-stayed structures in Autodesk Robot Structural Analysis Professional. *CADmaster*. 2012; 6:84-86. (rus.).
12. Koryakov A.S., Evstaf'eva E.B. Modern state of Shukhov's translucent structures. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013; 12:84-92. EDN RQAWIB. (rus.).
13. Kozhevnikov E.N. Prestressed trusses with a rigid curvilinear upper chord and a lattice of flexible elements. *Proceedings of the 3rd International Conference on Prestressed Metal Structures*. 1971; 141-155. (rus.).
14. Singaevsky P.M., Kozhevnikov K.M., Karadzhi K.M. On the determination of the optimal geometric scheme of some combined arched trusses with a flexible

lattice. News of Higher Educational Institutions. *Construction and Architecture*. 1971; 4:14-18. (rus.).

15. Sinitsyn Yu.N. On the design schemes and performance features of some steel rafter trusses of a combined system. News of Higher Educational Institutions. *Construction and Architecture*. 1964; 2:33-41. (rus.).

16. Koroleva E.Yu., Tryanina N.Yu. Stress-strain state of a two-hinged arch with a system of converging tie-rods. *XIII All-Russian Science Festival : collection of Abstracts*. 2023; 89-90. EDN MQRRUQ. (rus.).

17. Koroleva E.Yu., Tryanina N.Yu. Study of the work of a lattice arch vault with a system of converging ties.

International conference of the Nizhny Novgorod Science Festival : collection of abstracts. 2025; 104-105. EDN WFPOWA. (rus.).

18. Dolgusheva V.V., Ibragimov A.M. Comparing two types of combined arch-cable systems operation. *AIP Conference Proceedings*. 2023; 2791:030021. DOI: 10.1063/5.0143530

19. Dolgusheva V.V., Ibragimov A.M., Dolgushev T.V. Rational design concept of the combined arch system with inclined rods. *Academia. Architecture and Construction*. 2023; 2:168-174. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-2-168-174. EDN GCKCKR. (rus.).

Received March 2, 2026.

Adopted in revised form on March 20 2026.

Approved for publication on March 30, 2026.

B I O N O T E S: **Alexander M. Ibragimov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 704948, Scopus: 57189524528, ResearcherID: AFN-6830-2022, ORCID 0000-0003-3761-9213; igasu_alex@mail.ru;

Nadezhda Yu. Tryanina — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Theory of Structures and Technical Mechanics; **Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNSAGU)**; 65 Ilyinskaya st., Nizhny Novgorod, 603000, Russian Federation; ID RSCI: 454862, ORCID: 0009-0008-3845-3917; nadial2005@mail.ru;

Vera V. Dolgusheva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1061655, Scopus: 57212309767, ORCID: 0000-0002-8530-9546; DolgushevaVV@yandex.ru;

Timofey V. Dolgushev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of IU7 Computer Software and Information Technology; **Bauman Moscow State Technical University (BMSTU)**; build. 1.4, 11 Tverskaya st., Moscow, 125009, Russian Federation; ID RSCI: 1061498, Scopus: 57218657350, ResearcherID: AFX-6017-2022, ORCID: 0000-0002-0306-8890; dolgushew@yandex.ru.

Authors' contributions:

Alexander M. Ibragimov — scientific supervision, analysis and interpretation of data, critical revision of the draft manuscript.

Nadezhda Yu. Tryanina — scientific supervision, concept development, formulation of key goals and objectives, analysis and interpretation of data, critical revision of the draft manuscript.

Vera V. Dolgusheva — development of key goals and objectives, research, drafting of the manuscript, methodology development, model creation.

Timofey V. Dolgushev — development of key goals and objectives, research, drafting of the manuscript.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.012.4

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1125-1135

Методика определения параметров расчетной модели сталефибробетонных блоков по результатам испытаний

Павел Сергеевич Мильчевский^{1,2}, Владимир Евгеньевич Русанов^{1,2}

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

² Научно-инженерный центр Тоннельной ассоциации (НИЦ Тоннельной ассоциации); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Предмет исследования — определение параметров физически нелинейной расчетной модели сталефибробетона (СФБ) для применения в численном анализе напряженного состояния блоков сборной тоннельной обделки при воздействии щитовых домкратов при продвижении тоннелепроходческого механизированного комплекса. Актуальность исследования обусловлена необходимостью учета характера работы СФБ после образования трещин при воздействии локальных нагрузок от щитовых домкратов. При наличии нормативно определяемых показателей остаточной прочности на растяжение по испытаниям на изгиб $R_{0,5}$ и $R_{2,5}$ (ГОСТ Р 59535, EN 14651) отсутствует методика перехода от этих показателей к параметрам нелинейных расчетных моделей. Цель исследования — разработка методики определения предельной прочности при растяжении f_t и удельной энергии разрушения при растяжении G_f для модели Concrete Plastic Damage Model (CPDM) по результатам стандартных испытаний.

Материалы и методы. Использованы результаты испытаний образцов-призм с надрезом на изгиб с контролем раскрытия трещины, характеризующиеся остаточными прочностями $R_{0,5}$ и $R_{2,5}$. Применен обратный численный анализ: моделирование испытаний выполнено в ПК ZSoil с использованием модели CPDM, проведена серия параметрических расчетов при варьировании f_t и G_f и выполнен регрессионный анализ для установления функциональных связей между параметрами модели и остаточными прочностями СФБ на растяжение.

Результаты. Установлены закономерности влияния параметров f_t и G_f на значения $R_{0,5}$ и $R_{2,5}$, получены регрессионные зависимости и построены номограммы для определения параметров модели CPDM по данным испытаний. Выполнены верификация методики и расчет блока тоннельной обделки при локальном нагружении щитовыми домкратами, подтвердившие адекватное воспроизведение процесса трещинообразования с учетом остаточной несущей способности СФБ на растяжение.

Выводы. Разработанный подход обеспечивает практическое определение параметров нелинейной модели CPDM по нормативным испытаниям СФБ и может применяться при проектировании и расчетах блоков тоннельной обделки, воспринимающих локальные сосредоточенные нагрузки от щитовых домкратов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сталефибробетон, блоки тоннельной обделки, CPDM, нелинейное моделирование, остаточная прочность, ГОСТ Р 59535, EN 14651, щитовые домкраты

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мильчевский П.С., Русанов В.Е. Методика определения параметров расчетной модели сталефибробетонных блоков по результатам испытаний // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 7. С. 1125–1135. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1125-1135

Автор, ответственный за переписку: Павел Сергеевич Мильчевский, milchevsky.ps@nizta.ru.

Methodology for determining parameters of a computational model of steel fibre-reinforced concrete segments based on test results

Pavel S. Milchevskiy^{1,2}, Vladimir E. Rusanov^{1,2}

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

² Scientific and Engineering Centre of the Tunnel Association; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The subject of the study is the determination of parameters for a physically nonlinear computational model of steel fibre-reinforced concrete (SFRC) to be used in the numerical analysis of the stress state of precast tunnel lining segments subjected to loads transmitted by tunnel boring machine (TBM) thrust jacks during TBM advance. The relevance of the study is related to the need to account for the post-cracking behaviour of SFRC under localized jack forces. Although residual tensile strength parameters obtained from standard three-point bending tests, $R_{0,5}$ and $R_{2,5}$ (ГОСТ Р 59535, EN 14651), are available, a practical procedure for converting these parameters into inputs for nonlinear constitutive models

is not specified. The aim of this work is to develop a procedure for determining the tensile strength f_t and the tensile fracture energy G_f for the Concrete Plastic Damage Model (CPDM) based on standard test results.

Materials and methods. The study uses results of three-point bending tests on notched beam specimens with crack mouth opening displacement control, characterized by residual tensile strengths $R_{0.5}$ and $R_{2.5}$. An inverse numerical analysis was performed: the tests were simulated in ZSoil using the CPDM constitutive model; a series of parametric analyses was carried out by varying f_t and G_f ; and regression analysis was applied to establish functional relationships between the model parameters and the residual tensile strengths of SFRC.

Results. The influence of f_t and G_f on $R_{0.5}$ and $R_{2.5}$ was quantified, regression relationships were obtained, and nomograms were developed for determination of CPDM parameters from test data. The procedure was verified and further applied to the analysis of a tunnel lining segments under localized loading from TBM thrust jacks, demonstrating an adequate reproduction of the cracking process while accounting for the residual tensile load-carrying capacity of SFRC.

Conclusions. The proposed approach enables practical determination of CPDM parameters from standard SFRC tests and can be used in the design and structural analysis of tunnel lining segments subjected to localized concentrated loads from TBM thrust jacks.

KEYWORDS: steel fibre-reinforced concrete, tunnel lining segments, CPDM, nonlinear modeling, residual strength, GOST R 59535, EN 14651, shield jacks loading

FOR CITATION: Milchevskiy P.S., Rusanov V.E. Methodology for determining parameters of a computational model of steel fibre-reinforced concrete segments based on test results. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(7):1125-1135. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1125-1135 (rus.).

Corresponding author: Pavel S. Milchevskiy, milchevsky.ps@nizta.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Применение сталефибробетона (СФБ) в сборных круговых обделках транспортных тоннелей [1–9] — одно из наиболее активно развивающихся направлений современного тоннелестроения¹. Использование дисперсного армирования [10] позволяет повысить трещиностойкость блоков, а также оптимизировать затраты на их изготовление за счет сокращения объема традиционного стержневого армирования.

Согласно отчету рабочей группы 2 Международной тоннельной ассоциации², к 2016 г. реализовано более 70 объектов тоннелей со сборной обделкой из фибробетона (ФБ) со стальной или полимерной фиброй в различных странах мира [11]. Диаметры тоннелей варьируются от 2 м для коммунальных сооружений до 14 м для транспортных. Международная практика включает как комбинированные решения (стержневая арматура + фибра), так и конструкции только с фибровым армированием [12].

Дальнейшее развитие этого направления отражено в рекомендациях отчета³. В документе сформулированы принципы расчета блоков с учетом остаточной прочности ФБ на растяжение, а также отмечено, что стадия работы щитовых домкратов (TBM thrust phase) является одной из наиболее ответственных, поскольку блоки воспринимают локальные сосредоточенные нагрузки, способные вызывать

образование трещин и развитие повреждений [13]. При этом расчет блоков на данной стадии требует учета характера работы ФБ после образования трещин [14]. В рекомендациях² и остаточная прочность ФБ на растяжение определяется по результатам испытаний образцов-призм на изгиб с контролем ширины раскрытия трещины (надреза) по нормативам^{4, 5}. Однако переход от нормативных показателей $R_{0.5}$, $R_{2.5}$ или $f_{r,1}$, $f_{r,3}$ ⁶ к параметрам нелинейных численных моделей материала в указанных документах не регламентирован.

В современных расчетных комплексах для анализа бетонных и железобетонных конструкций широко используется модель Concrete Plastic Damage Model (CPDM)⁷ [15], позволяющая учитывать пластичность и накопление повреждений в материале при растяжении и сжатии. Для корректного применения этой модели к СФБ требуется определение параметров [16], характеризующих поведение при растяжении, прежде всего предельной прочности при растяжении f_t и удельной энергии разрушения при растяжении G_f .

В опубликованных источниках отсутствует унифицированная методика определения указанных параметров CPDM по результатам стандартных испытаний по нормативам (ГОСТ Р 59535, EN 14651), это затрудняет практическое применение нелинейных численных моделей при расчете блоков тоннельной обделки при локальном нагружении. В этой связи

¹ СТО НОСТРОЙ 2.27.125–2013. Освоение подземного пространства. Конструкции транспортных тоннелей из фибробетона. Правила проектирования и производства работ. М.: Национальное объединение строителей, 2015.

² ITA Report No. 16 — Twenty years of FRC tunnel segments practice: lessons learnt and proposed design principles 2016. P. 71.

³ ITAtech Report No. 7 — ITAtech Design guidance for precast fibre reinforced concrete segments. 2016.

⁴ ГОСТ Р 59535–2021. Бетоны тяжелые и мелкозернистые, дисперсно-армированные стальной фиброй. Технические условия.

⁵ EN 14651:2005. Test method for metallic fibre concrete — Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). Brussels: CEN, 2005. 16 p.

⁶ fib Model Code for Concrete Structures 2020 (MC 2020).

⁷ СП 360.1325800.2017. Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования.

разработка методики определения параметров модели CPDM для СФБ по результатам стандартных испытаний на изгиб — актуальная научно-практическая задача, направленная на обеспечение корректного численного моделирования напряженного состояния блоков тоннельной обделки.

Цель настоящего исследования — разработка методики определения параметров f_t и G_t модели CPDM по остаточным прочностям СФБ на растяжение $R_{0,5}$ и $R_{2,5}$, получаемым по нормативам, и оценка применимости такого подхода для анализа напряженного состояния [17] блоков тоннельной обделки при действии локальных нагрузок от щитовых домкратов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Общие положения и постановка задачи

Для численного анализа напряженного состояния СФБ блоков тоннельной обделки использована модель Concrete Plastic Damage Model, реализованная в программном комплексе (ПК) ZSoil⁸. Модель позволяет учитывать пластичность [18] и накопление повреждений при растяжении и сжатии, а также воспроизводить поведение материала после образования трещин.

Основными параметрами CPDM, определяющими работу СФБ при растяжении, являются:

- предельная прочность при растяжении f_t , МПа;
- удельная энергия разрушения при растяжении G_p , МН/м.

⁸ Truty A. Elastic-Plastic Damage Model for Concrete. ZSoil Technical Report 020116 (revised 02.01.2021). Lausanne, Switzerland : Zace Services Ltd., 2021. 27 p.

В инженерной практике исходными характеристиками СФБ служат остаточные прочности $R_{0,5}$ и $R_{2,5}$, определяемые по результатам испытаний образцов-призм с надрезом на изгиб по трехточечной схеме по нормативам (ГОСТ Р 59535, EN 14651) (рис. 1). Поскольку прямая аналитическая связь между указанными нормативными показателями и параметрами CPDM отсутствует, задача определения f_t и G_t решалась методом обратного численного анализа.

Краткое описание модели CPDM

Модель CPDM представляет собой упругопластическую модель бетона, учитывающую снижение жесткости при накоплении материалом повреждений (при превышении предела прочности) с параметрическим описанием характера работы отдельно при сжатии и растяжении.

Номинальные напряжения определяются выражением:

$$\sigma = (1 - D) \cdot E_0 \cdot (\varepsilon - \varepsilon_p), \quad (1)$$

где D — параметр повреждения ($0 \leq D \leq 1$); E_0 — начальный модуль упругости; ε — полная деформация; ε_p — пластическая деформация.

Для описания различий поведения при растяжении и сжатии используются независимые параметры повреждения D_t и D_c . Характер работы при растяжении после образования трещин устанавливается величиной удельной энергии разрушения G_p , характеризующей площадь под нисходящей ветвью диаграммы «напряжение — деформация».

Для СФБ корректное задание G_t дает возможность учитывать остаточную несущую способность материала на растяжение после образования трещин, обусловленную работой фибровых волокон.

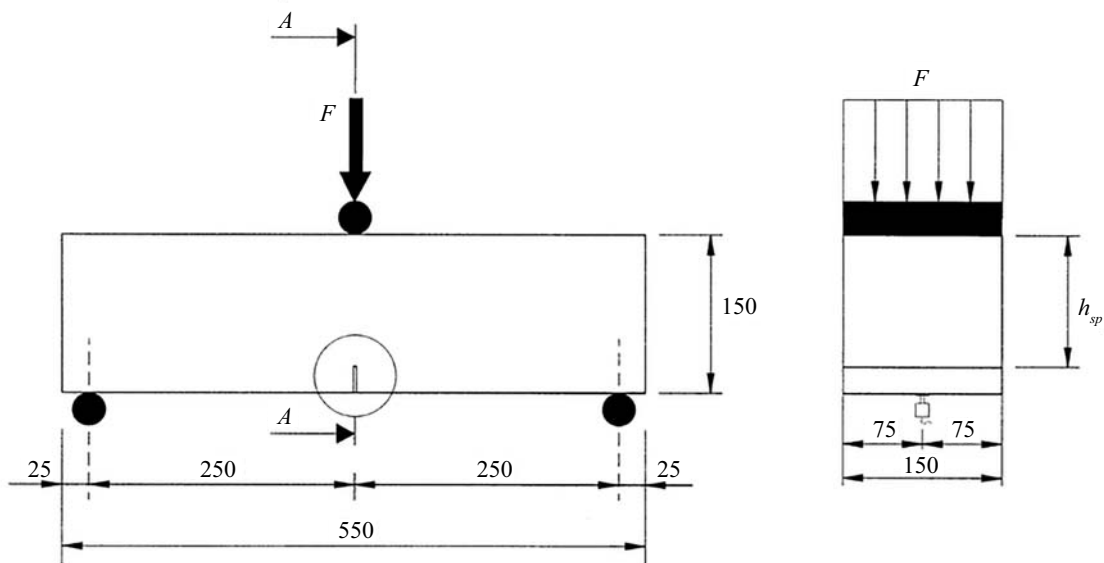


Рис. 1. Схема испытаний образцов-призм с надрезом на изгиб по ГОСТ Р 59535 (EN 14651)

Fig. 1. Three-point bending test configuration for notched prism specimens according to GOST R 59535 (EN 14651)

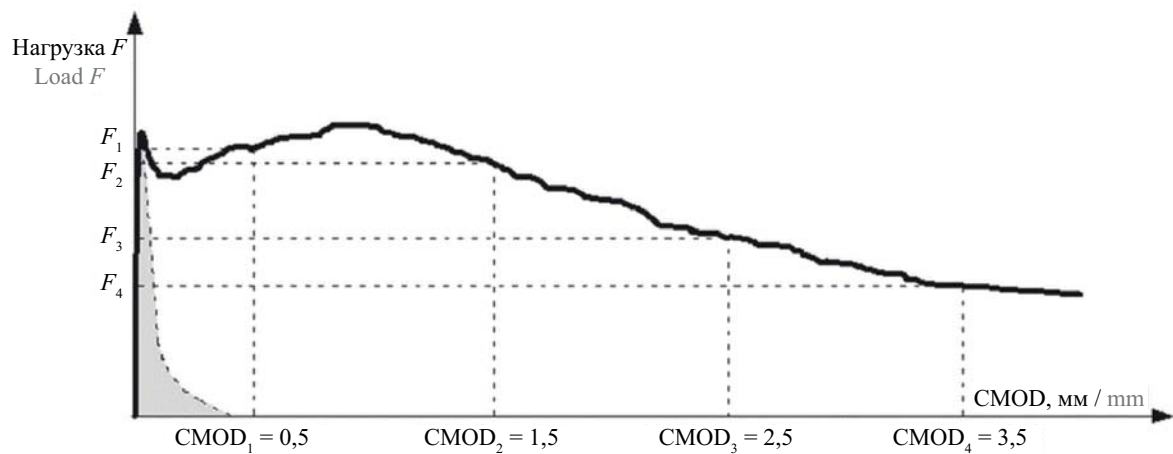


Рис. 2. Пример зависимости «нагрузка – CMOD»

Fig. 2. Example of the “load – CMOD” relationship

Исходные данные и предпосылки

В качестве эталонного (базового) испытания для определения параметров модели использована методика испытаний образцов-призм с надрезом

на изгиб по трехточечной схеме по ГОСТ Р 59535 (EN 14651).

На физических образцах испытываются образцы-призмы размерами 150 × 150 × 550 мм с пролетом

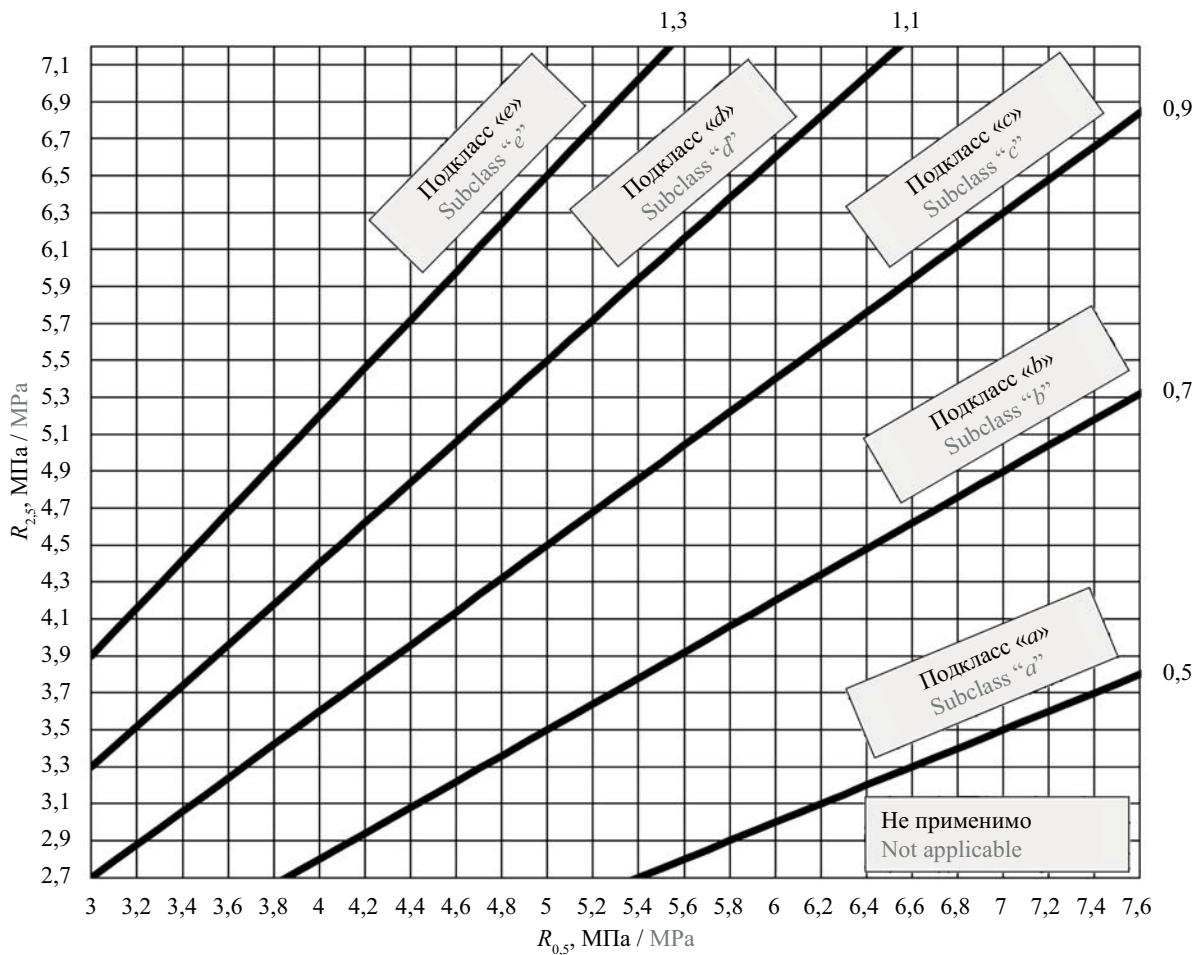


Рис. 3. Графическое отображение границ подклассов СФБ по остаточной прочности на растяжение в выбранных для исследования диапазонах $R_{0,5}$ и $R_{2,5}$

Fig. 3. Visualization of tensile residual strength subclasses of SFRC for research values $R_{0,5}$ and $R_{2,5}$

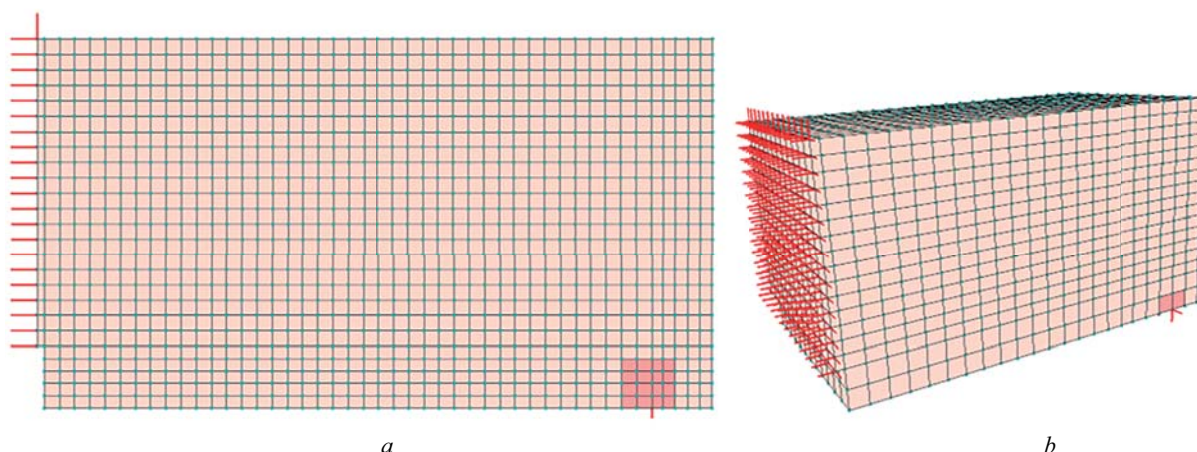


Рис. 4. Модели образцов-призм размерами 150 × 150 × 550 мм (по плоскости симметрии) для выполнения численных экспериментов: 2D-модель (а); 3D-модель (б)

Fig. 4. Numerical models of 150 × 150 × 550 mm notched prism specimens (symmetry plane) used for numerical experiments: 2D model (a); 3D model (b)

между опорами 500 мм. В нижней зоне по центру пролета предусматривается надрез глубиной 25 мм (эффективная высота сечения 125 мм). Нагрузка прикладывается в середине пролета образца. В ходе испытаний выполняется построение зависимости «нагрузка – раскрытие трещины/надреза» («нагрузка – CMOD») (рис. 2). По результатам испытаний определяются остаточные прочности $R_{0,5}$ (при CMOD = 0,5 мм) и $R_{2,5}$ (при CMOD = 2,5 мм).

В соответствии с положениями СП 360.1325800 и fib Model Code 2020 фибробетон классифицируется по уровню остаточной прочности на растяжение и соотношению остаточных прочностей при различных раскрытиях трещины (CMOD). В частности, для подкласса «с» характерно соотношение:

$$0,9 \leq R_{2,5}/R_{0,5} < 1,1,$$

что соответствует устойчивому поведению материала после образования трещин с близкими значениями остаточной прочности при малых и больших раскрытиях трещин.

Подкласс «с» является наиболее распространенным при проектировании сборных тоннельных оболочек из СФБ, поскольку обеспечивает сбалансированную работу материала при локальном нагружении и на стадии воздействия щитовых домкратов.

В качестве исходных данных использовались нормативные диапазоны остаточных прочностей $R_{0,5}$ и $R_{2,5}$, характерные для выбранного подкласса материала «с» (рис. 3) [19].

Выполнение численных экспериментов

Численное моделирование процесса испытания выполнено в ПК ZSoil в 2D- и 3D-постановке с применением модели CPDM (рис. 4).

Механические характеристики СФБ (модуль упругости E , коэффициент Пуассона ν , прочность на сжатие f_c) принимались постоянными в соответствии с исход-

ными характеристиками рассматриваемого бетон-матрицы без изменения в рамках серии расчетов.

Для установления зависимости между нормативными значениями остаточной прочности ФБ на растяжение и параметрами CPDM проведена серия численных экспериментов с варьированием f_t и G_t .

Диапазоны изменения остаточных прочностей составляли:

$$3,0 \leq R_{0,5} \leq 7,6 \text{ МПа};$$

$$2,7 \leq R_{2,5} \leq 7,2 \text{ МПа}.$$

В указанных пределах проведено 30 расчетов, охватывающих диапазон классов СФБ по остаточной прочности на растяжение при низкой дозировке фибры (ориентировочно 40 кг/м³, что соответствует проценту армирования 0,5 %) до высокой дозировки (ориентировочно 80 кг/м³ — 1 % армирования). Для каждой комбинации параметров определялись расчетные значения остаточных прочностей по методике ГОСТ Р 59535 (EN 14651). Подбор параметров f_t и G_t осуществлялся до достижения достаточной точности совпадения расчетных и целевых значений $R_{0,5}$ и $R_{2,5}$.

Полученные результаты были использованы для построения регрессионных зависимостей, связывающих параметры CPDM с нормативными показателями СФБ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние параметров f_t и G_t на остаточную прочность СФБ при растяжении

Анализ результатов серии численных экспериментов показал, что параметры модели CPDM по-разному влияют на остаточные прочности, определяемые по ГОСТ Р 59535 (EN 14651).

Установлено, что:

- увеличение предельной прочности при растяжении f_t преимущественно влияет на величину

остаточной прочности $R_{0,5}$, характеризующей сопротивление материала при малом раскрытии трещины;

- увеличение удельной энергии разрушения G_l оказывает доминирующее влияние на величину остаточной прочности $R_{2,5}$, определяющей несущую способность материала при значительном раскрытии трещины.

Таким образом, параметр f_t определяет начальный уровень несущей способности после образования первой трещины, тогда как G_l характеризует интенсивность снижения напряжений при развитии

трещины [20] и величину остаточного сопротивления на поздних стадиях нагружения.

Полученные закономерности согласуются с физическим смыслом модели CPDM и особенностями работы СФБ, в котором фибровые волокна обеспечивают сопротивление раскрытию трещины на стадии развития трещин (повреждений).

Получение регрессионных зависимостей

По результатам 30 численных экспериментов выполнена регрессионная обработка данных с целью установления количественной связи между норма-

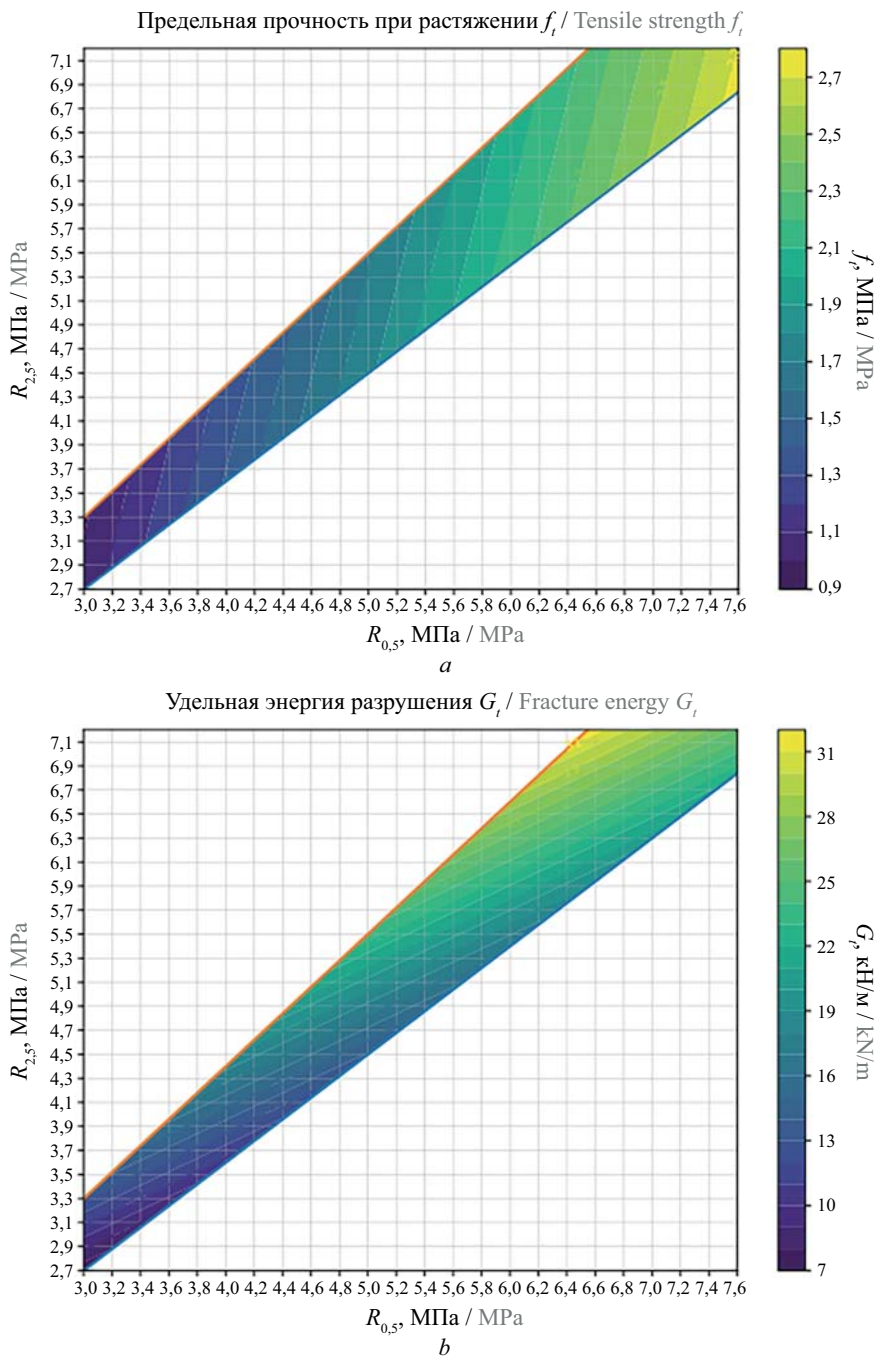


Рис. 5. Номограммы для определения параметров модели CPDM: $f_t(a)$; $G_l(b)$

Fig. 5. Nomograms for determining CPDM model parameters: $f_t(a)$; $G_l(b)$

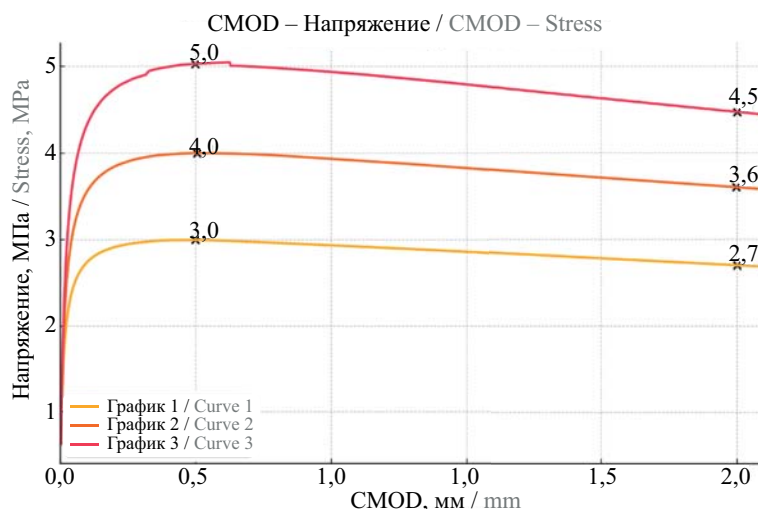


Рис. 6. Графики «напряжение – CMOD», построенные при верификации методики

Fig. 6. “Stress – CMOD” curves resulting from verification of the methodology

тивными остаточными прочностями $R_{0,5}$, $R_{2,5}$ и параметрами модели f_t , G_t .

В пределах рассматриваемого диапазона остаточных прочностей получены следующие приближенные зависимости:

$$f_t = 0,452 \cdot R_{0,5} - 0,093 \cdot R_{2,5} - 0,063; \quad (2)$$

$$G_t = -0,00543 \cdot R_{0,5} + 0,00966 \cdot R_{2,5} - 0,00246, \quad (3)$$

где $R_{0,5}$, $R_{2,5}$, f_t — в МПа; G_t — МН/м.

Коэффициенты детерминации для полученных зависимостей составили:

$$(R_f)^2 > 0,99; \quad (R_{G_t})^2 > 0,96,$$

что свидетельствует о высокой степени аппроксимации результатов численного моделирования. Формулы (2) и (3) справедливы в диапазоне:

$$3,0 \leq R_{0,5} \leq 7,6 \text{ МПа};$$

$$2,7 \leq R_{2,5} \leq 7,2 \text{ МПа}.$$

В пределах данного интервала достигается устойчивая сходимость решения и корректное воспроизведение диаграмм «нагрузка – CMOD».

Номограммы и практическое применение зависимостей

На основании полученных регрессионных выражений построены номограммы, позволяющие по заданным значениям $R_{0,5}$ и $R_{2,5}$ оперативно определить параметры f_t и G_t без проведения дополнительных численных экспериментов (рис. 5).

Анализ номограмм показывает, что:

- параметр f_t возрастает преимущественно при увеличении $R_{0,5}$, при этом влияние $R_{2,5}$ является менее выраженным;
- параметр G_t существенно возрастает при увеличении $R_{2,5}$, тогда как влияние $R_{0,5}$ имеет второстепенный характер.

Таким образом, остаточная прочность СФБ на растяжение при малом раскрытии трещины определяет

уровень начальной несущей способности после образования трещины, а остаточная прочность СФБ на растяжение при большом раскрытии трещины характеризует величину энергии разрушения и способность материала сохранять несущую способность на поздних стадиях развития трещины.

Предложенные зависимости обеспечивают возможность перехода от нормативных характеристик СФБ, определяемых по ГОСТ Р 59535 (EN 14651), к параметрам нелинейной модели CPDM, что существенно упрощает применение численного моделирования при выполнении расчетов и проектирования СФБ тоннельных обделок.

Верификация результатов

Для проверки корректности разработанной методики выполнены контрольные расчеты с использованием параметров f_t и G_t , определенных по формулам (2) и (3).

Сравнение расчетных диаграмм «нагрузка – CMOD» и диаграмм, построенных по нормативным данным, показало высокую сходимость в контрольных точках при CMOD = 0,5 и 2,5 мм (рис. 6). Расхождение по нагрузке не превышало 1–3 % в пределах рассматриваемого диапазона прочностей. Полученные результаты подтверждают адекватность предложенной методики определения параметров модели CPDM.

Применение методики для расчета блока тоннельной обделки на воздействия от щитовых домкратов

Постановка расчетной задачи

Полученные по результатам численных экспериментов параметры модели CPDM были использованы для численного анализа напряженного состояния фрагмента сборной тоннельной обделки из СФБ (одного блока) при воздействии нагрузки от щитовых домкратов в процессе продвижения тоннелепроходческого механизированного комплекса (ТПМК).

Целью расчета являлась оценка характера распределения напряжений и развития трещин в блоке при действии локальных нагрузок, моделирующих воздействие щитовых домкратов.

В расчетной схеме воспроизводилась работа отдельного блока круговой обделки с учетом:

- геометрических параметров блока;
- контактного взаимодействия в зонах приложения нагрузки от щитовых домкратов;
- нелинейного поведения материала в рамках модели CPDM.

Нагрузки прикладывались равномерно распределенными в зонах контакта с опорными площадками, имитирующими передачу нагрузок от домкратов тоннелепроходческого щита.

Расчет выполнен методом конечных элементов в постановке физически нелинейной задачи. В качестве модели материала использовалась модель CPDM с параметрами f_t и G_p , определенными по формулам (2) и (3) для выбранного класса и подкласса СФБ по остаточной прочности на растяжение.

Конечно-элементная модель блока учитывала:

- трехмерное напряженное состояние в зоне приложения нагрузки;
- развитие растягивающих напряжений в опорных и средних зонах блока;
- накопление повреждений при достижении предельной прочности при растяжении.

Для обеспечения устойчивости расчета применялась пошаговая схема нагружения с контролем сходимости по невязке сил и энергии деформации.

Анализ напряженного состояния и трещинообразования

Результаты расчета показали, что при увеличении нагрузки от щитовых домкратов в блоке формируются локальные зоны растяжения, концентрирующиеся:

- в области контакта с домкратной площадкой;
- в зонах изгиба в средней части сегмента.

При достижении предельной прочности при растяжении в данных зонах начинается трещинообразование (рост параметра D_f), сопровождающееся снижением жесткости материала и перераспределением напряжений (рис. 7).

Применение модели CPDM позволило воспроизвести характер постепенного развития трещин с сохранением остаточной несущей способности блока при растяжении благодаря работе стальной фибры. В отличие от линейно-упругой модели с хрупким разрушением, расчет показал наличие устойчивой стадии деформирования после образования трещин без мгновенной потери несущей способности.

Анализ распределения трещин (повреждений) подтвердил, что увеличение параметра G_p , соответствующее более высокой остаточной прочности $R_{2,5}$, приводит к замедлению развития трещин и снижению концентрации деформаций в зоне локального растяжения.

Сопоставительный анализ расчетов для различных классов СФБ показал, что:

- увеличение $R_{0,5}$ повышает уровень начального сопротивления трещинообразованию;
- увеличение $R_{2,5}$ обеспечивает более плавное развитие повреждений и увеличение предельной нагрузки на блок.

Таким образом, остаточная прочность СФБ на растяжение при большом раскрытии трещины оказывает существенное влияние на характер разрушения блоков обделки при локальном нагружении и на предельную величину нагрузки, предшествующей разрушению блока.

Полученные результаты согласуются с рекомендациями³, в которых подчеркивается необходимость

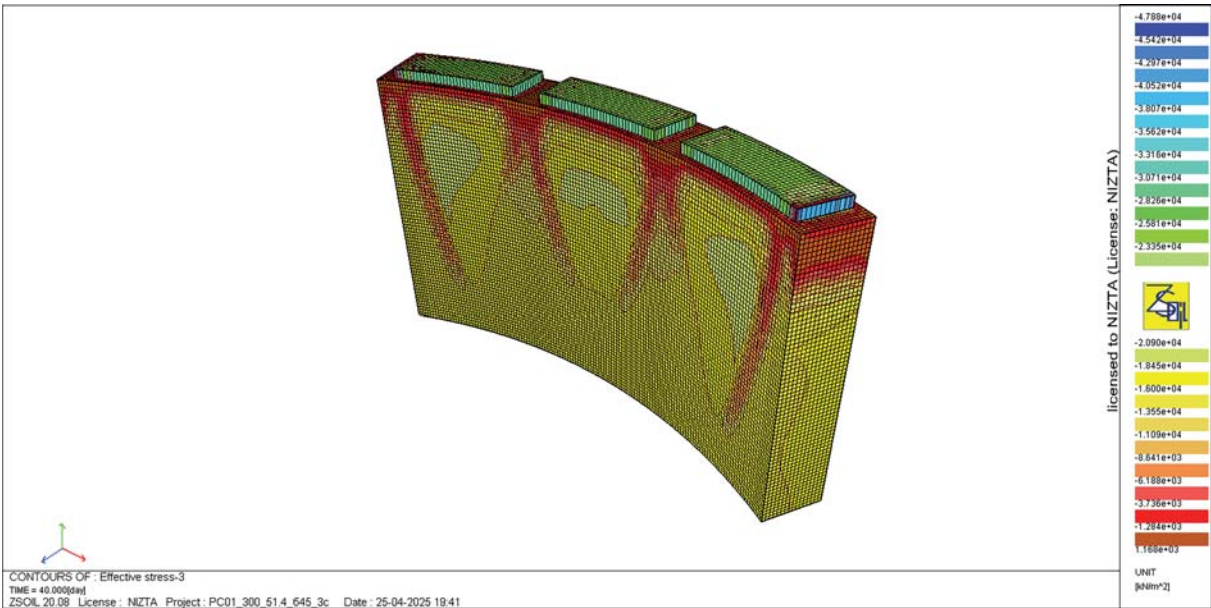


Рис. 7. Изополя главных растягивающих напряжений σ_3 в блоке

Fig. 7. Colour contours of the principal tensile stress σ_3 in the segment

учета поведения ФБ после образования трещин при расчете блоков обделки на воздействия от щитовых домкратов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика определения параметров f_t и G_t модели Concrete Plastic Damage Model для СФБ по результатам стандартных испытаний на изгиб с контролем раскрытия трещины по ГОСТ Р 59535, EN 14651.

По результатам серии численных экспериментов получены регрессионные зависимости, связывающие нормативные остаточные прочности $R_{0,5}$ и $R_{2,5}$ СФБ на растяжение с параметрами нелинейной модели материала f_t и G_t . Коэффициенты детерминации $(R_f)^2 > 0,99$ и $(R_{G_t})^2 > 0,96$ подтверждают устойчивость и точность предложенной аппроксимации в пределах исследованного диапазона характеристик.

Установлено, что параметр f_t преимущественно определяет момент начала трещинообразования, тогда как параметр G_t оказывает определяющее влияние на развитие трещин (повреждений) и предельную несущую способность блока при локальном нагружении (щитовыми домкратами).

Применение предложенной методики определения параметров f_t и G_t для модели материала CPDM к расчету блоков тоннельной обделки при воздей-

ствии локальных нагрузок, моделирующих работу щитовых домкратов, позволило воспроизвести:

- формирование трещин в зонах концентрации растягивающих напряжений;
- постепенное развитие трещин (повреждений) без мгновенной потери несущей способности;
- перераспределение напряжений в блоке за счет остаточной прочности СФБ.

Показано, что увеличение остаточной прочности на растяжение при малом раскрытии трещины $R_{0,5}$ повышает уровень сопротивления трещинообразованию, тогда как увеличение $R_{2,5}$ обеспечивает более устойчивое деформирование с трещинами и рост предельной несущей способности блока.

Разработанный подход обеспечивает практический переход от нормативных характеристик материала, определяемых по ГОСТ Р 59535, EN 14651, к параметрам физически нелинейной расчетной модели и позволяет:

- выполнять оценку напряженного состояния блоков обделки на стадии локального нагружения;
- обоснованно выбирать класс и подкласс СФБ по остаточной прочности на растяжение;
- проводить расчет до разрушения блока с учетом перераспределения внутренних усилий при образовании трещин.

Предложенная методика дополняет существующие рекомендации по проектированию ФБ блоков.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Serafini R., Dantas S.R.A., Salvador R.P., Agra R.R., de Figueiredo A.D., Rambo D.A.S. et al. Influence of fire on temperature gradient and physical-mechanical properties of macro-synthetic fiber reinforced concrete for tunnel linings // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 214. Pp. 254–268. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.133. EDN XAUQMB.

2. Galeote E., Picazo A., Alberti M.G., de la Fuente A., Enfedaque A., Gálvez Ja.C. et al. Statistical analysis of an experimental database on residual flexural strengths of fiber reinforced concretes: Performance-based equations // *Structural Concrete*. 2022. Vol. 23. Issue 5. Pp. 3140–3153. DOI: 10.1002/suco.202100416. EDN UGRMFB.

3. Spagnuolo S., Meda A. Precast CSA-based concrete tunnel lining segments reinforced with GFRP bars: Challenges and opportunities // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 425. P. 136007. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136007. EDN NRUKEPH.

4. Benoit D.R. Design and construction of FRC tunnel lining with fibre enabled carbon footprint reduction // *Tunnelling into a Sustainable Future — Methods and Technologies*. 2025. Pp. 67–74. DOI: 10.1201/9781003559047-9

5. Statistical Process Control of Fiber-Reinforced Concrete Precast Tunnel Segments // *ACI Materials Jour-*

nal. 2024. Vol. 121. Issue 2. DOI: 10.14359/51740373. EDN XWXSBBK.

6. Rossi B., Gaczewski A., Erkus O., Mak P. Europe's largest internal diameter steel fibre-reinforced tunnel // *Tunnelling into a Sustainable Future — Methods and Technologies*. 2025. Pp. 3152–3159. DOI: 10.1201/9781003559047-402

7. Mohammad Hosseini S., Mousa S., Mohamed H.M., Ferrier E., Benmokrane B. Experimental and analytical investigation of precast fiber-reinforced concrete (FRC) tunnel lining segments reinforced with glass-FRP bars // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023. Vol. 139. P. 105230. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105230. EDN DEJBPE.

8. Patel D., Pleesudjai Ch., Bui V., Pridemore P., Schaef S., Mobasher B. Mechanical response of precast tunnel segments with steel and synthetic macro-fibers // *Cement and Concrete Composites*. 2023. Vol. 144. P. 105303. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105303. EDN HSKQBG.

9. Petraroia D.N., Plückelmann S., Mark P., Breitenbücher R. Tunnel lining segments with enhanced bearing capacity using hybrid concrete concepts // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2024. Vol. 143. P. 105484. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105484. EDN YSHELG.

10. Каприелов С.С., Чилин И.А. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций // Строительные материалы. 2013. № 7. С. 28–30. EDN QOXHLN.

11. Namli M. Evaluation of the effect of using fiber reinforcement in tunnel linings for metro projects // Underground Space. 2021. Vol. 6. Issue 6. Pp. 732–750. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.08.002. EDN QIOFFC.

12. Русанов В.Е., Алексеев В.А., Маркин М.В., Мильчевский П.С. Использование фибробетона при проектировании высокоточных обделок в транспортном строительстве // Строительное материаловедение: настоящее и будущее : сб. мат. III Всеросс. науч. конф., посвящ. девяностолетию кафедры строительного материаловедения. 2023. С. 254–259. EDN PMLDPC.

13. Liao L., de la Fuente A., Cavalaro S., Aguado A. Design of FRC tunnel segments considering the ductility requirements of the Model Code 2010 // Tunnelling and Underground Space Technology. 2015. Vol. 47. Pp. 200–210. DOI: 10.1016/j.tust.2015.01.006

14. Русанов В.Е. К оценке эффективности применения фибробетона в сборных тоннельных обделках // Транспортное строительство. 2010. № 3. С. 13–16. EDN MEGMPP.

15. Lee J., Fenves G.L. Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures // Journal of Engi-

neering Mechanics. 1998. Vol. 124. Issue 8. Pp. 892–900. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(1998)124:8(892)

16. Aidarov S., Mena F., de la Fuente A. Structural response of a fibre reinforced concrete pile-supported flat slab: full-scale test // Engineering Structures. 2021. Vol. 239. P. 112292. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112292. EDN GCNIOI.

17. Острик А.В., Ким В.В., Острик М.А. Численное моделирование деформирования и разрушения конструкций из бетонных композитов при нестационарном нагружении // Конструкции из композиционных материалов. 2022. № 4 (168). С. 21–28. DOI: 10.52190/2073-2562_2022_4_21. EDN AZQVOE.

18. Бударин А.М., Ремпель Г.И., Камзолкин А.А., Алехин В.Н. Деформационно-прочностная модель бетона с двойным независимым упрочнением и повреждением // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 4. С. 527–543. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.527-543. EDN ПJBPRQ.

19. Русанов В.Е. Определение прочностных и деформативных свойств сталефибробетона для расчета тоннельных обделок // Вестник МГСУ. 2010. № 2. С. 189–197. EDN MUXQJJ.

20. Соловьев Л.Ю. Нелинейная модель бетона на основе теории пластического течения // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4 (24). С. 131–140. EDN TFBEMN.

Поступила в редакцию 5 марта 2026 г.

Принята в доработанном виде 15 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 30 марта 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Павел Сергеевич Мильчевский — преподаватель кафедры механики грунтов и геотехники; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; заместитель генерального директора; Научно-инженерный центр Тоннельной ассоциации (НИЦ Тоннельной ассоциации); 129344, г. Москва, ул. Кольская, д. 2, корп. 6; milchevsky.ps@nizta.ru;

Владимир Евгеньевич Русанов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики грунтов и геотехники; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; генеральный директор; Научно-инженерный центр Тоннельной ассоциации (НИЦ Тоннельной ассоциации); 129344, г. Москва, ул. Кольская, д. 2, корп. 6; rusanov.ve@nizta.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Serafini R., Dantas S.R.A., Salvador R.P., Agra R.R., de Figueiredo A.D., Rambo D.A.S. et al. Influence of fire on temperature gradient and physical-mechanical properties of macro-synthetic fiber reinforced concrete for tunnel linings. *Construction and Building Materials*. 2019; 214:254–268. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.133. EDN XAUQMB.

2. Galeote E., Picazo Á., Alberti M.G., de la Fuente A., Enfedaque A., Gálvez Ja.C. et al. Statistical analysis of an experimental database on residual flexural strengths

of fiber reinforced concretes: Performance-based equations. *Structural Concrete*. 2022; 23(5):3140–3153. DOI: 10.1002/suco.202100416. EDN UGRMFB.

3. Spagnuolo S., Meda A. Precast CSA-based concrete tunnel lining segments reinforced with GFRP bars: Challenges and opportunities. *Construction and Building Materials*. 2024; 425:136007. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136007. EDN NRUKPH.

4. Benoit D.R. Design and construction of FRC tunnel lining with fibre enabled carbon footprint reduction.

Tunnelling into a Sustainable Future — Methods and Technologies. 2025; 67-74. DOI: 10.1201/9781003559047-9

5. Statistical Process Control of Fiber-Reinforced Concrete Precast Tunnel Segments. *ACI Materials Journal*. 2024; 121(2). DOI: 10.14359/51740373. EDN XWXS BK.

6. Rossi B., Gaczewski A., Erkus O., Mak P. Europe's largest internal diameter steel fibre-reinforced tunnel. *Tunnelling into a Sustainable Future — Methods and Technologies*. 2025; 3152-3159. DOI: 10.1201/9781003559047-402

7. Mohammad Hosseini S., Mousa S., Mohamed H.M., Ferrier E., Benmokrane B. Experimental and analytical investigation of precast fiber-reinforced concrete (FRC) tunnel lining segments reinforced with glass-FRP bars. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023; 139:105230. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105230. EDN DEJBPE.

8. Patel D., Plesudjai Ch., Bui V., Pridemore P., Schaef S., Mobasher B. Mechanical response of precast tunnel segments with steel and synthetic macro-fibers. *Cement and Concrete Composites*. 2023; 144:105303. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105303. EDN HSKQBG.

9. Petrarola D.N., Plükelmann S., Mark P., Breitenbücher R. Tunnel lining segments with enhanced bearing capacity using hybrid concrete concepts. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2024; 143:105484. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105484. EDN YSHEL G.

10. Kaprielov S.S., Chilin I.A. Ultra-High-Strength Self-Compacting Fiber Reinforced Concrete for Cast-in-Place Structures. *Construction Materials*. 2013; 7:28-30. EDN QOXHLN. (rus.).

11. Namli M. Evaluation of the effect of using fiber reinforcement in tunnel linings for metro projects. *Underground Space*. 2021; 6(6):732-750. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.08.002. EDN QIOFFC.

12. Rusanov V.E., Alekseev V.A., Markin M.V., Milchevsky P.S. Application of Fiber Reinforced Concrete in the Design of High-Precision Tunnel Linings in Transport Construction. *Construction Materials Science: Present and Future : Proceedings of the III All-Russian*

Scientific Conference Dedicated to the 90th Anniversary of the Department of Construction Materials Science. 2023; 254-259. EDN PMLDPC. (rus.).

13. Liao L., de la Fuente A., Cavalaro S., Aguado A. Design of FRC tunnel segments considering the ductility requirements of the Model Code 2010. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015; 47:200-210. DOI: 10.1016/j.tust.2015.01.006

14. Rusanov V.E. To an estimation of efficiency of fibre reinforced concrete application in tunnel segment lining. *Transport Construction*. 2010; 3:13-16. EDN MEGMPP. (rus.).

15. Lee J., Fenves G.L. Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. *Journal of Engineering Mechanics*. 1998; 124(8):892-900. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(1998)124:8(892)

16. Aidarov S., Mena F., de la Fuente A. Structural response of a fibre reinforced concrete pile-supported flat slab: full-scale test. *Engineering Structures*. 2021; 239:112292. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112292. EDN GCNIOI.

17. Ostrik A.V., Kim V.V., Ostrik M.A. Numerical modeling of deformation and fracture of constructions made of concrete composites under non-stationary loading. *Composite Materials Constructions*. 2022; 4(168): 21-28. DOI: 10.52190/2073-2562_2022_4_21. EDN AZQVOE. (rus.).

18. Budarin A.M., Rempel G.I., Kamzolkin A.A., Alekhin V.N. Concrete damage-plasticity model with double independent hardening. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4): 527-543. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.527-543. EDN IJBPQ. (rus.).

19. Rusanov V.E. Determination of Strength and Deformation Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete for Tunnel Lining Design. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2010; 2:189-197. EDN MUXQJJ. (rus.).

20. Soloviev L.Yu. Non-linear concrete model based on the plastic flow theory. *Systems. Methods. Technologies*. 2014; 4(24):131-140. EDN TFBEMN. (rus.).

Received March 5, 2026.

Adopted in revised form on March 15, 2026.

Approved for publication on March 30, 2026.

BIONOTES: **Pavel S. Milchevskiy** — lecturer at the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Deputy General Director; **Scientific and Engineering Center of the Tunnel Association**; build. 6, 2 Kolskaya st., Moscow, 129344, Russian Federation; milchevsky.ps@nizta.ru;

Vladimir E. Rusanov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; General Director; **Scientific and Engineering Center of the Tunnel Association**; build. 6, 2 Kolskaya st., Moscow, 129344, Russian Federation; rusanov.ve@nizta.ru.

Author contributions: all authors made an equal contribution to the preparation of this publication.

The authors declare no conflict of interest.

Оценка сейсмостойкости железобетонных зданий повышенной этажности линейно-спектральным методом

Олег Вартанович Мкртычев, Тимур Алиханович Тагиров

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

АННОТАЦИЯ

Введение. С помощью линейно-спектрального метода (ЛСМ) исследуется сейсмостойкость зданий повышенной этажности. Рассматриваются шесть зданий различной этажности рамно-связевой каркасной системы. Приведены собственные частоты и формы колебаний, проведена оценка изменения динамических характеристик сооружений при увеличении этажности и различной жесткости основания. Получены мозаики усилий и перемещений, а также изополя армирования. Выполнен анализ изменения напряженно-деформированного состояния основных несущих элементов здания в зависимости от этажности и условий опирания. Представлено предельное значение этажности для здания рассматриваемой конструктивной схемы при сейсмическом воздействии интенсивностью 9 баллов по шкале MSK-64.

Материалы и методы. Объектами исследования являются шесть монолитных железобетонных зданий различной этажности рамно-связевой конструктивной схемы с различными условиями опирания. Исследование производится с помощью ЛСМ. Расчет выполняется в соответствии с действующими нормативными требованиями к проектированию зданий в сейсмических районах.

Результаты. Результаты исследования позволили получить количественную оценку рациональности использования рамно-связевой конструктивной схемы для зданий рассматриваемой этажности. Установлено влияние этажности и жесткости основания на распределение усилий, перемещений и требуемого армирования вертикальных несущих элементов.

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы при формировании рекомендаций по выбору конструктивной схемы, определению рациональных сечений вертикальных несущих элементов и оценке допустимой этажности зданий повышенной этажности, возводимых в сейсмических районах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сейсмическое воздействие, интенсивное землетрясение, высотные здания, модальный анализ, линейно-спектральный метод, категории грунтов по сейсмическим свойствам, рамно-связевой каркас

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мкртычев О.В., Тагиров Т.А. Оценка сейсмостойкости железобетонных зданий повышенной этажности линейно-спектральным методом // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 7. С. 1136–1147. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1136-1147

Автор, ответственный за переписку: Тимур Алиханович Тагиров, tagirovv_timur@mail.ru.

Seismic resistance assessment of reinforced concrete high-rise buildings using the linear response spectrum method

Oleg V. Mkrtychev, Timur A. Tagirov

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

ABSTRACT

Introduction. This study investigates the seismic performance of high-rise buildings using the linear response spectrum method (LRSМ). Six buildings of different heights with a frame–shear wall structural system are considered. Natural frequencies and vibration mode shapes were determined, along with contour plots of internal forces and displacements and maps of required reinforcement. The variation of the stress-strain state of the main load-bearing elements depending on the number of storeys and support conditions was analyzed. The limiting number of storeys for the considered structural system under seismic action with an intensity of 9 according to the MSK-64 scale was determined. The influence of increasing building height and foundation stiffness on the dynamic characteristics of the structures was also evaluated.

Materials and methods. The study considers six monolithic reinforced concrete buildings of different heights with a frame–shear wall structural system and different support conditions. The structural analysis was carried out using the linear response spectrum method. The calculations were performed in accordance with current seismic design codes for buildings constructed in seismic regions.

Results. The results made it possible to obtain a quantitative assessment of the applicability of the frame–shear wall structural system for buildings within the considered height range. The influence of the number of storeys and foundation stiffness on the distribution of internal forces, lateral displacements, and the required reinforcement of vertical load-bearing elements was identified.

Conclusions. The obtained results may be used to develop recommendations for selecting structural systems, determining rational cross-sections of vertical load-bearing members, and assessing the permissible height of buildings constructed in seismic regions.

KEYWORDS: seismic action, strong earthquake, high-rise buildings, modal analysis, linear-spectral method, seismic soil classification, frame-shear wall structural system

FOR CITATION: Mkrtychev O.V., Tagirov T.A. Seismic resistance assessment of reinforced concrete high-rise buildings using the linear response spectrum method. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(7):1136-1147. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1136-1147 (rus.).

Corresponding author: Timur A. Tagirov, tagirovv_timur@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы все большее распространение получает строительство зданий повышенной этажности в сейсмических районах с расчетной сейсмично-

стью 7–9 баллов по шкале MSK-64 [1]. Это обусловлено, с одной стороны, высокой стоимостью земельных участков и необходимостью уплотнения застройки, а с другой — изменением градостроительных подходов, ориентированных на рост многофункциональных

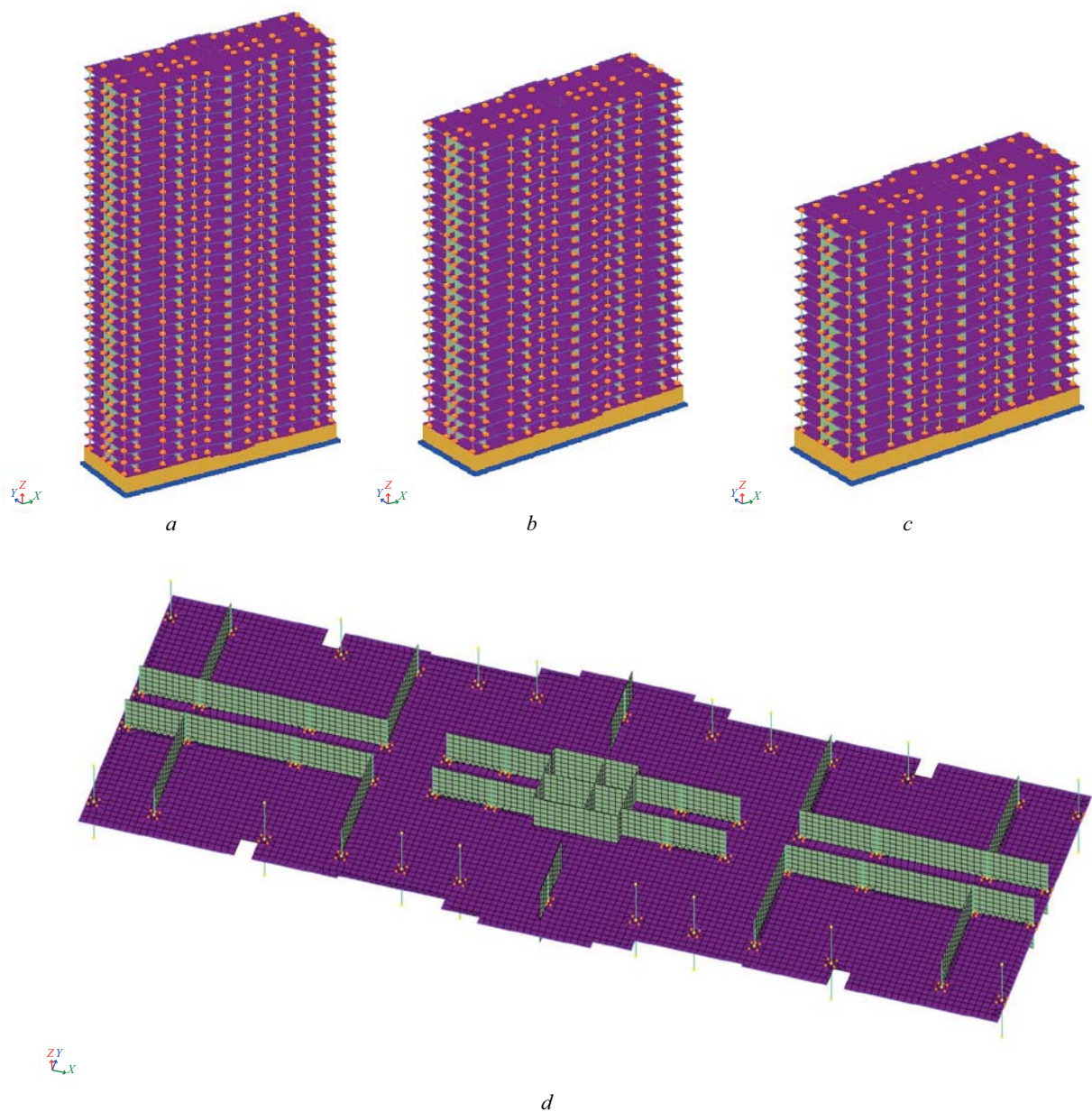


Рис. 1. Расчетная схема: *a* — 32-этажное здание; *b* — 24-этажное здание; *c* — 16-этажное здание; *d* — план типового этажа
Fig. 1. Analytical model: *a* — 32-storey building; *b* — 24-storey building; *c* — 16-storey building; *d* — typical floor plan

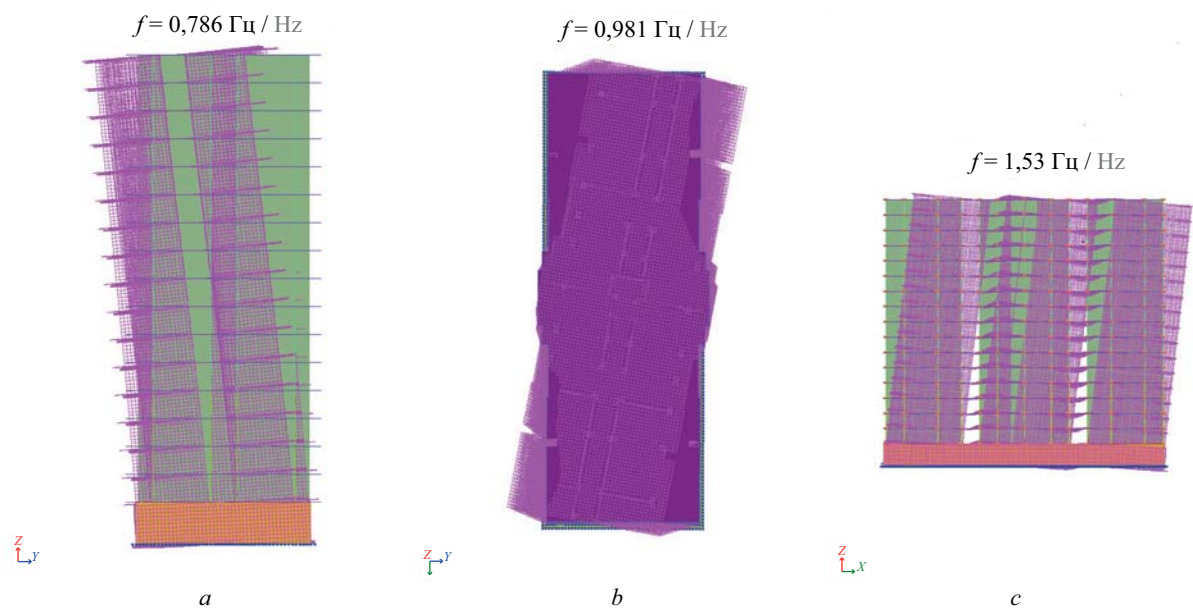


Рис. 2. Модальный анализ 16-этажного здания на упругом основании: *a* — 1-я форма колебаний; *b* — 2-я форма колебаний; *c* — 3-я форма колебаний

Fig. 2. Modal analysis of the 16-storey building on an elastic foundation: *a* — 1st mode shape; *b* — 2nd mode shape; *c* — 3rd mode shape

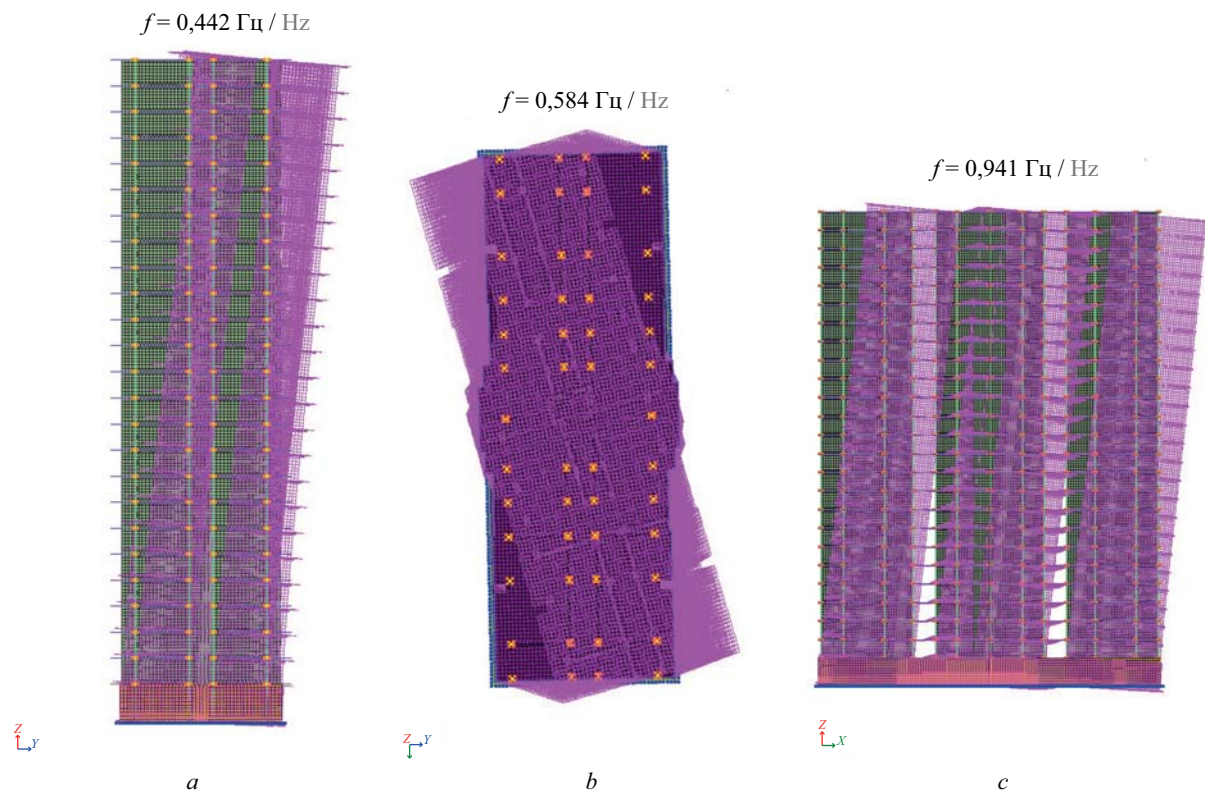


Рис. 3. Модальный анализ 24-этажного здания на упругом основании: *a* — 1-я форма колебаний; *b* — 2-я форма колебаний; *c* — 3-я форма колебаний

Fig. 3. Modal analysis of the 24-storey building on an elastic foundation: *a* — 1st mode shape; *b* — 2nd mode shape; *c* — 3rd mode shape

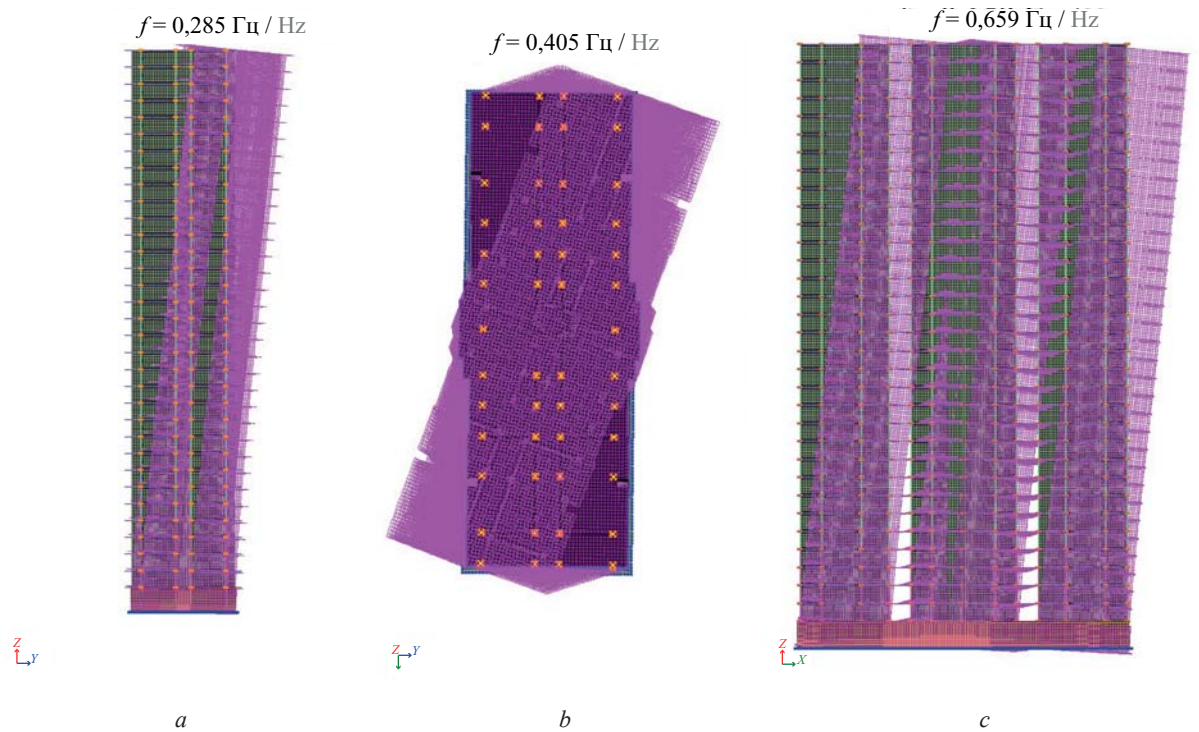


Рис. 4. Модальный анализ 32-этажного здания на упругом основании: *a* — 1-я форма колебаний; *b* — 2-я форма колебаний; *c* — 3-я форма колебаний

Fig. 4. Modal analysis of the 32-storey building on an elastic foundation: *a* — 1st mode shape; *b* — 2nd mode shape; *c* — 3rd mode shape

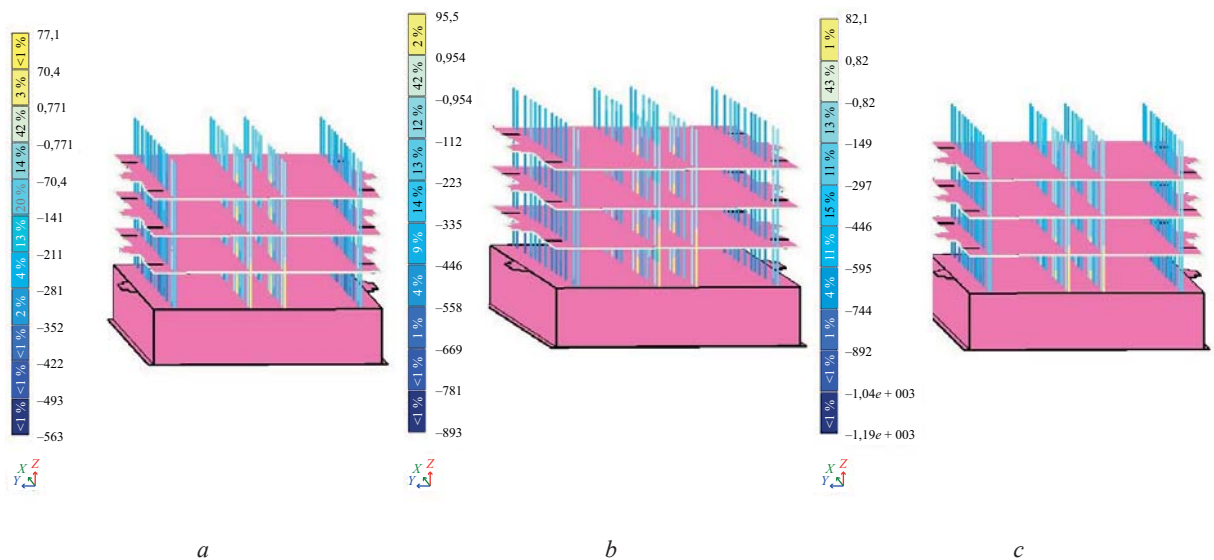


Рис. 5. Мозаики усилий в колоннах на отм. с +0,000 до +12,000: *a* — 16-этажного здания; *b* — 24-этажного здания; *c* — 32-этажного здания

Fig. 5. Force contours in columns at elevations from +0.000 to +12.000: *a* — 16-storey building; *b* — 24-storey building; *c* — 32-storey building

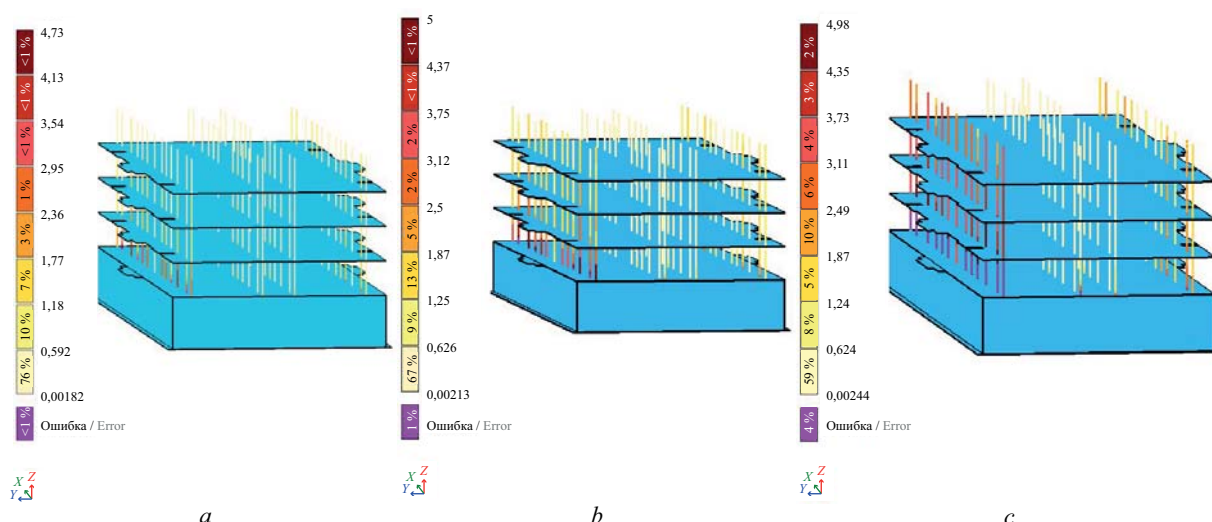


Рис. 6. Процент армирования колонн на отм. с +0,000 до +12,000: а — 16-этажного здания; б — 24-этажного здания; с — 32-этажного здания

Fig. 6. Column reinforcement ratio at elevations from +0.000 to +12.000: а — 16-storey building; б — 24-storey building; с — 32-storey building

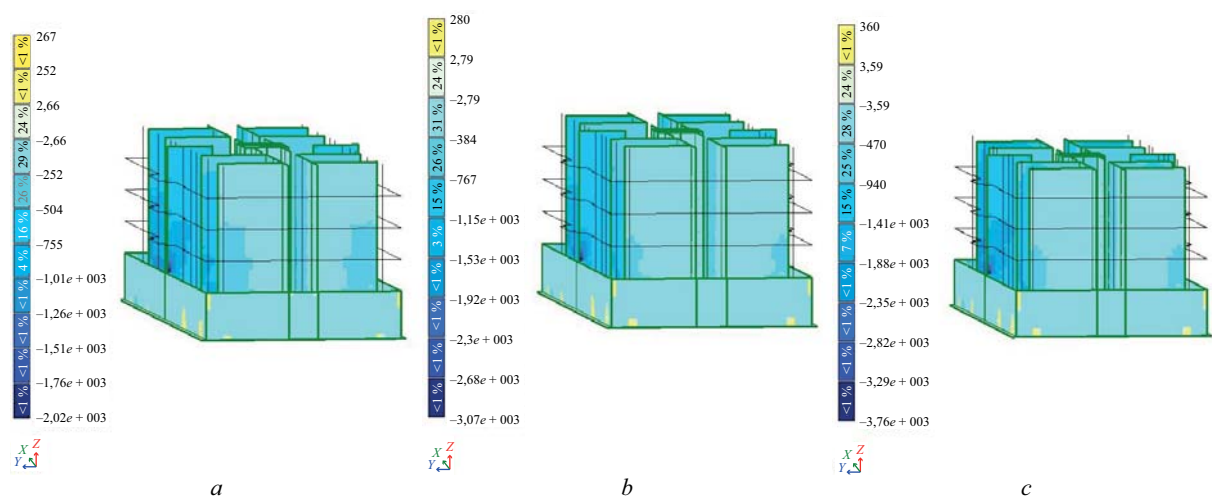


Рис. 7. Мозаики напряжений в стенах на отм. с +0,000 до +9,000: а — 16-этажного здания; б — 24-этажного здания; с — 32-этажного здания

Fig. 7. Stress contours in walls at elevations from +0.000 to +9.000: а — 16-storey building; б — 24-storey building; с — 32-storey building

комплексов повышенной этажности и формирование комплексного развития территорий. В этих условиях особую актуальность приобретает проверка применимости традиционных конструктивных схем и расчетных моделей к новым диапазонам этажности при соответствующей сейсмичности [2–4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являются: 16-этажное здание высотой 48 м; 24-этажное высотой 72 м; 32-этажное, высотой 96 м. Рассматриваются схемы на жестком и упругом основании с динамическим модулем деформации $E = 100$ МПа. Здания выполне-

ны из монолитного железобетона [5–9] (бетон класса В30).

Основные элементы здания: сечения колонн 1–4-го этажей в схемах для 24- и 32-этажных зданий во всех расчетных схемах — 600×600 мм (для схем 16-этажного здания сечения площадью 500×500 мм и 600×600 мм); выше — 500×500 мм, стены приняты толщиной 300 мм (рис. 1). Высота этажа — 3,0 м, размеры в плане — $55 \times 18,6$ м.

Расчетные исследования проводились с помощью линейно-спектрального метода (ЛСМ). Далее приведены результаты расчетов, выполненных в соответствии с действующими нормами проектирова-

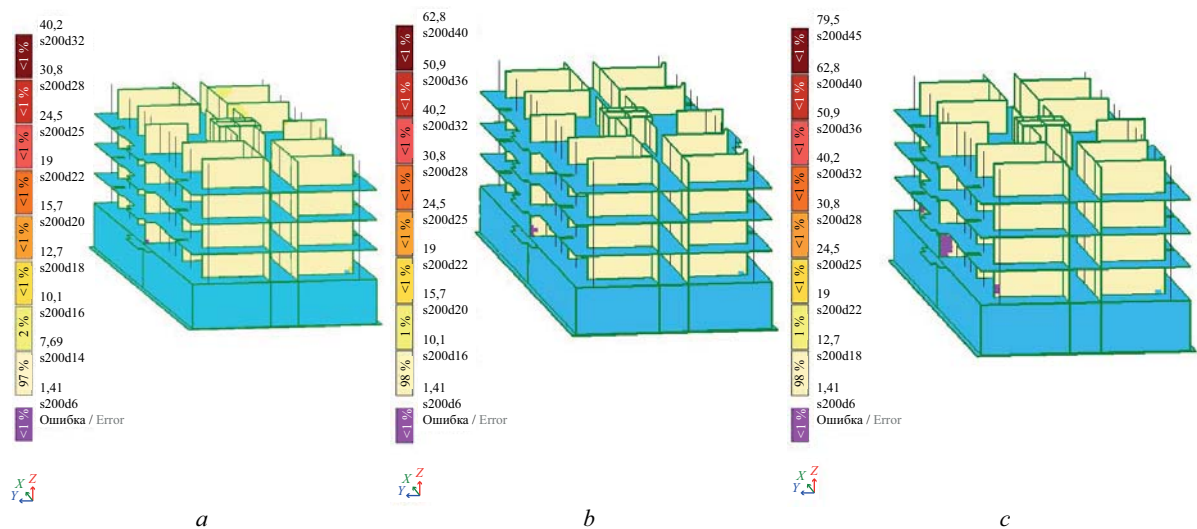


Рис. 8. Мозаики нижнего армирования по оси X в стенах на отм. с +0,000 до +9,000: a — 16-этажного здания; b — 24-этажного здания; c — 32-этажного здания

Fig. 8. Bottom reinforcement maps along the X -axis in walls at elevations from +0.000 to +9.000: a — 16-storey building; b — 24-storey building; c — 32-storey building

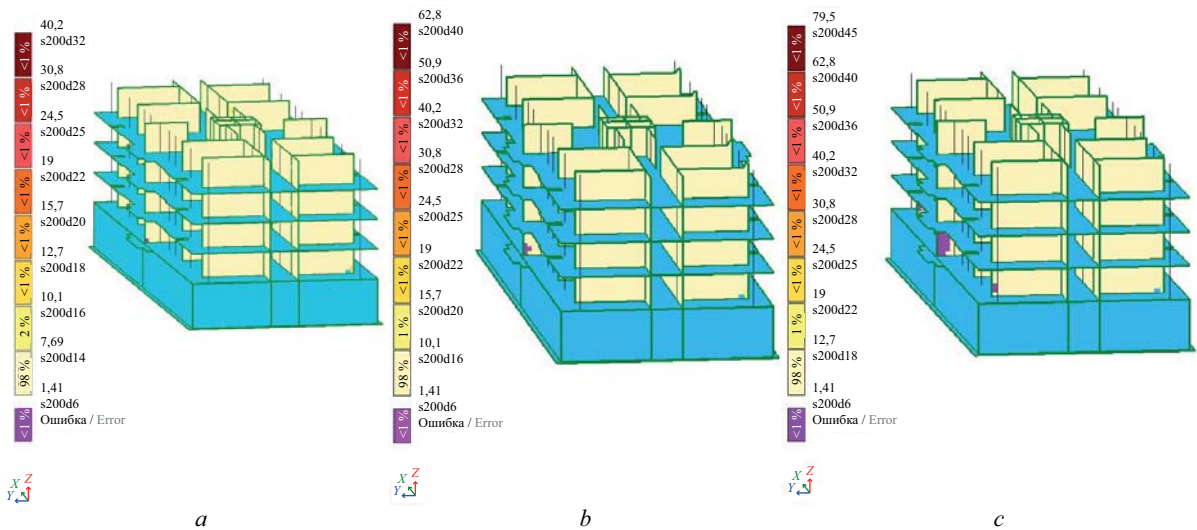


Рис. 9. Мозаики верхнего армирования по оси X в стенах на отм. с +0,000 до +9,000: a — 16-этажного здания; b — 24-этажного здания; c — 32-этажного здания

Fig. 9. Top reinforcement maps along the X -axis in walls at elevations from +0.000 to +9.000: a — 16-storey building; b — 24-storey building; c — 32-storey building

ния [10] на расчетное сейсмическое воздействие интенсивностью 9 баллов по шкале MSK-64.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате расчета были определены основные собственные частоты и формы колебаний. На рис. 2–4 представлены 1-я, 2-я и 3-я формы колебаний для расчетных схем 16-, 24- и 32-этажного здания на упругом основании.

Анализ результатов расчета угловых, рядовых и внутренних колонн на отметках (отм.) — 4,500,

0,000, +9,000, +12,000 и для верхних отметок зданий для вариантов 16-, 24- и 32-этажного здания показывает, что для схемы с жестким защемлением основания (соответствует 1-й категории грунтов по сейсмическим свойствам) [11–16], в сравнении со зданием на податливом основании при $E = 100$ МПа (соответствует грунтам 2-й категории по сейсмическим свойствам), наблюдается существенное расхождение по горизонтальным перемещениям верха зданий, в то время как продольные силы N , поперечные силы Q_y и изгибающие моменты M_z изменяются незначительно (рис. 5).

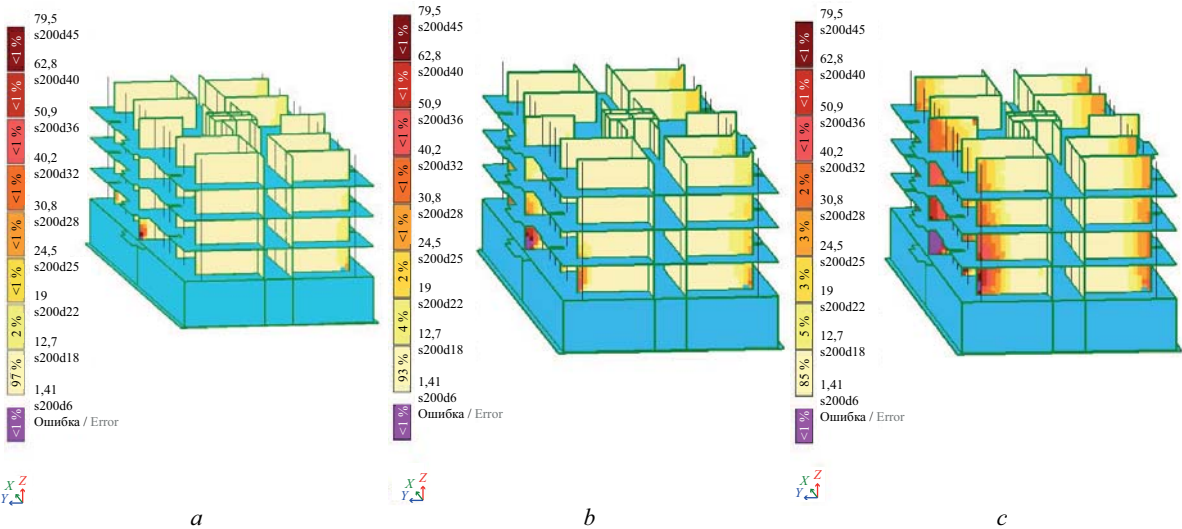


Рис. 10. Мозаики нижнего армирования по оси Y в стенах на отм. с +0,000 до +9,000: a — 16-этажного здания; b — 24-этажного здания; c — 32-этажного здания

Fig. 10. Bottom reinforcement maps along the Y -axis in walls at elevations from +0.000 to +9.000: a — 16-storey building; b — 24-storey building; c — 32-storey building

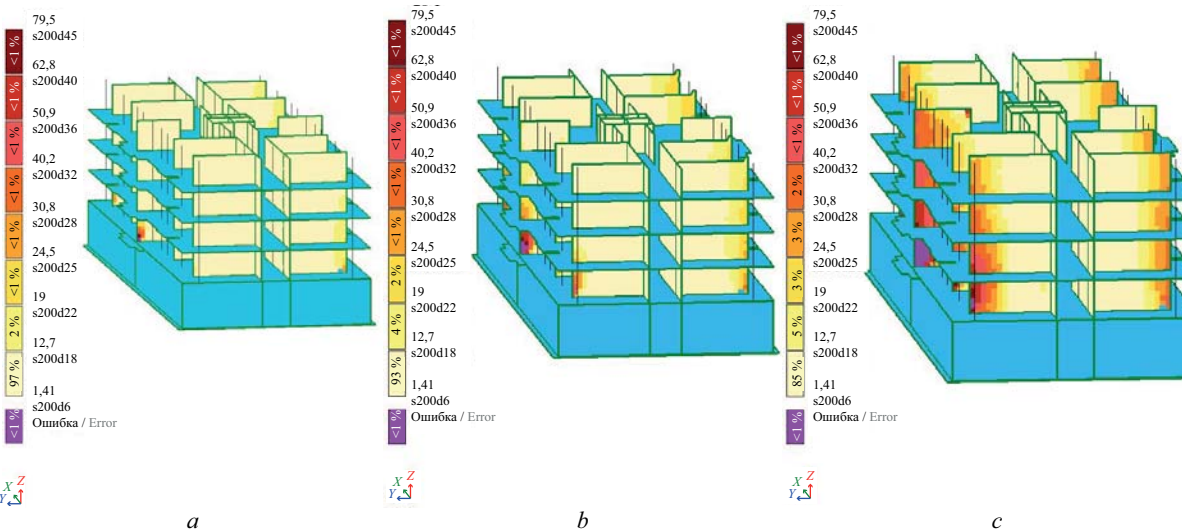


Рис. 11. Мозаики верхнего армирования по оси Y в стенах на отм. с +0,000 до +9,000: a — 16-этажного здания; b — 24-этажного здания; c — 32-этажного здания

Fig. 11. Top reinforcement maps along the Y -axis in walls at elevations from +0.000 to +9.000: a — 16-storey building; b — 24-storey building; c — 32-storey building

Для характерных вертикальных элементов (угловые и рядовые колонны на отм. 0,000 и +9,000, а также внутренние колонны на тех же уровнях) относительное отличие расчетных горизонтальных перемещений достигает порядка 40–50 %.

Это непосредственно отражается на изгибающих моментах в сечениях колонн и на требуемом проценте продольного армирования (рис. 6): для ряда элементов при условии жесткого защемления в основании процент армирования колонн составляет 0,8–1,3 %, тогда как при учете податливости основания требуемое армирование — 0,1–0,6 %.

Наибольшее различие в усилиях для жесткого опирания и податливого основания в колоннах наблюдается на отм. +12,000. Для угловых и рядовых колонн на этом уровне программный комплекс при подборе армирования фиксирует ошибку армирования (невозможность подбора или выход за предельные конструктивные ограничения).

Для верхних этажей выше отм. +12,000 влияние условий опирания выражено слабее, однако и здесь схема с жестким основанием дает несколько более высокие значения поперечных сил и изгибающих

Усилия, перемещения и армирование в колоннах
Forces, displacements and columns reinforcement

Рядовая колонна –4,500 / Typical column –4.500		
Продольные силы N /Axial forces N		
16 этажей 16 floors	24 этажа 24 floors	32 этажа 32 floors
9,1	11,7	21,7
Поперечные силы Q _y / Shear forces Q _y		
45,5	46,0	48,6
Процент армирования / Reinforcement ratio		
0,1 (ж) / (f)	0,4 (ж) / (f)	0,4 (ж) / (f)
Рядовая колонна 0,000 / Typical column 0,000		
Продольные силы N /Axial forces N		
16 этажей 16 floors	24 этажа 24 floors	32 этажа 32 floors
0,0	16,5	25,2
Поперечные силы Q _y / Shear forces Q _y		
70,1	60,8	62,4
Процент армирования / Reinforcement ratio		
0,2 (ж) / (f)	0,4 (ж) / (f)	0,5 (ж) / (f)
Внутренняя колонна 0,000 / Interior column 0,000		
Продольные силы N /Axial forces N		
16 этажей 16 floors	24 этажа 24 floors	32 этажа 32 floors
15,9 (ж) / (f)	4,2 (ж) / (f)	3,5 (ж) / (f)
Поперечные силы Q _y / Shear forces Q _y		
25,5 (ж) / (f)	38,8	37,9
Процент армирования / Reinforcement ratio		
0,1 (ж) / (f)	0,5	0,6
Внутренняя колонна +9,000 / Interior column +9.000		
Продольные силы N /Axial forces N		
16 этажей 16 floors	24 этажа 24 floors	32 этажа 32 floors
14,3 (ж) / (f)	13,6 (ж) / (f)	6,0 (ж) / (f)
Поперечные силы Q _y / Shear forces Q _y		
14,2	12,0	20,0 (ж) / (f)
Процент армирования / Reinforcement ratio		
0,5	0,3	0,2
Внутренняя колонна +12,000 / Interior column +12.000		
Продольные силы N /Axial forces N		
16 этажей 16 floors	24 этажа 24 floors	32 этажа 32 floors
24,0	20,4 (ж) / (f)	6,0 (ж) / (f)
Поперечные силы Q _y / Shear forces Q _y		
23,2	20,4	74,8
Процент армирования / Reinforcement ratio		
0,12	0,2	0,2

Окончание табл. / End of the Table

Рядовая колонна +12,000 / Typical column +12.000		
Продольные силы N / Axial forces N		
16 этажей 16 floors	24 этажа 24 floors	32 этажа 32 floors
18,8	13,0	13,6
Поперечные силы Q_v / Shear forces Q_v		
76,3	84,8	80,6
Процент армирования / Reinforcement ratio		
0,2	1,1	Ошибка армирования Reinforcement error
Рядовая колонна верхнего яруса здания / Typical upper-storey column		
Продольные силы N / Axial forces N		
16 этажей 16 floors	24 этажа 24 floors	32 этажа 32 floors
8,6	4,7	4,0
Поперечные силы Q_v / Shear forces Q_v		
35,7 (ж) / (f)	97,0 (ж) / (f)	95,5 (ж) / (f)
Процент армирования / Reinforcement ratio		
0,0	0,0	0,1

Примечание: (ж) означает максимум для схемы с жестким защемлением основания.
Note: (f) indicates the maximum for the fixed-base configuration.

моментов в рядовых колоннах на фоне близких горизонтальных перемещений.

Для 16-этажного здания площади колонн нижних ярусов 500×500 мм оказывается недостаточной для обеспечения требуемой несущей способности. Увеличение площади поперечного сечения колонн с 500×500 мм до 600×600 мм на отметках от 0,000 до +9,000 позволило уменьшить число элементов с ошибками армирования (по условиям прочности и армирования) с 41 элемента до 22 элементов, несмотря на сохраняющиеся локальные пиковые значения процента армирования.

Анализ результатов расчета стен на отм. с 0,000 до +9,000 показал, что увеличение этажности прямо влияет на увеличение продольных сил (рис. 7) и повышение площади армирования (рис. 8–11), которая с увеличением этажности здания приводит к резкому росту числа элементов с ошибками армирования (с 1 ошибки (для 1-го элемента) в случае 16-этажного здания, до 4 ошибок в случае 24-этажного здания и 23 ошибок в случае 32-этажного здания), как и для колонн на тех же отметках.

Основным результатом проведенного расчетного исследования является количественная оценка рациональности использования рамно-связевой конструктивной схемы для рассматриваемого диапазона этажности, а также оценка влияния моделирования основания на распределение усилий, перемещений и требуемого армирования при проектировании и строительстве в сейсмических районах с интенсивностью 9 баллов.

В таблице приведены разности усилий, перемещений и требуемого армирования для колонн в зависимости от этажности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Применение классических конструктивных схем, в частности рамно-связевого каркаса для зданий повышенной этажности (больше 16 этажей), проектируемых в сейсмических районах с интенсивностью 8–9 баллов, имеет существенное ограничение по этажности.

Установлено, что для рассматриваемых случаев максимальная этажность для районов с интенсивностью землетрясения 9 баллов составляет 16, в некоторых случаях 24 этажа для приемлемых размеров поперечных сечений колонн и стен (колонн 500×500 мм, 600×600 мм, стен до 300 мм) в рамках данного объемно-планировочного решения. Для монолитных железобетонных зданий при интенсивности сейсмического воздействия 8–9 баллов и этажности 24 и более этажей следует применять иные принципиальные конструктивные схемы, позволяющие обеспечить требуемый уровень сейсмостойкости. При этом должны быть выполнены соответствующие углубленные расчетные обоснования, в том числе с применением нелинейных динамических методов [17–20].

Полученные результаты могут быть использованы при формировании рекомендаций по выбору конструктивной схемы, сечений вертикальных несущих элементов для зданий повышенной этажности, возводимых в сейсмических районах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Aznaw G.* Advances in Seismic Design for High-Rise Buildings : a Systematic Review of New Techniques and Materials // *American Journal of Civil Engineering*. 2025. Vol. 13. Issue 2. Pp. 81–95. DOI: 10.11648/j.ajce.20251302.13. EDN RSRAIL.
2. *Zhao X., Xu Q.* The role of nonlinear dynamic analysis in seismic design for tall buildings: Challenges and limitations // *Journal of Structural Engineering*. 2020. Vol. 146. Issue 12. P. 04020193. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002597
3. *Zhang Li., Xue S., Zhang R., Xie L., Hao L.* Simplified multimode control of seismic response of high-rise chimneys using distributed tuned mass inerter systems (TMIS) // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 228. P. 111550. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111550. EDN FJXBSZ.
4. *Мкртычев О.В., Тагиров Т.А., Лохова Е.М.* Реакция высотного здания на акселерограммы представительного набора // *Промышленное и гражданское строительство*. 2025. № 1. С. 14–19. DOI: 10.33622/0869-7019.2025.01.14-19. EDN ISEUPI.
5. *Fernando F., Sahputra D.E., Fatchurrohman N.* Performance Analysis of Regular and Irregular Horizontal Multi-Story Buildings Structure // *Indonesian Journal of Computing, Engineering and Design*. 2025. Vol. 7. Issue 2. Pp. 144–152. DOI: 10.35806/ijoced.v7i2.554. EDN PDTRKD.
6. *Болотин В.В.* Статистические методы в строительной механике. М. : Стройиздат, 1961. 203 с.
7. *Reshetov A.A., Lokhova E.M.* Assessment of the Influence of the Rotational Components of Seismic Action on the Sss of a Multistorey Reinforced Concrete Building // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. Vol. 18. Issue 1. Pp. 82–91. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-82-91. EDN ESREAB.
8. *Bulushev S.V., Dudareva M.S.* Nonlinear models of reinforced concrete beam elements with the actual reinforcement // *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020. P. 032040. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032040. EDN UXIHWN.
9. *Тяпин А.Г.* Применение комбинированного асимптотического метода для расчета высотного здания на сейсмическое воздействие: особенности реакции низкочастотного сооружения // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2018. № 6. С. 19–24. EDN YTXRUT.
10. *Qiao F., Bo J., Chang Ch., Wang L., Shen Ch.* Comparative Study of the Seismic Response Characteristics of Three Special Soils // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Issue 20. P. 11375. DOI: 10.3390/app132011375. EDN XSIXNP.
11. *Антикаев Ф.Ф.* Влияние грунтовых условий на характеристики сейсмических воздействий // *Лавровские чтения Арктика: актуальные проблемы и вызовы : сб. науч. мат. Всеросс. конф. с междунар. участием*. 2023. С. 174–176. EDN FLEWCM.
12. *Sharapov D.A., Gebre T.H., Ali Yu.M.* The effect of story drift in a multi-story building under the influence of an earthquake // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021. Vol. 17. Issue 3. Pp. 270–277. DOI: 10.22363/1815-5235-2021-17-3-270-277. EDN AUUGMZ.
13. *Пишеничкина 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.
14. *Меркурьев Ю.С.* Моделирование сейсмического воздействия на земляное полотно с демпфирующим слоем. Сравнение аналитического и конечно-элементного методов // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2023. № 4 (60). С. 122–134. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-4-122-134. EDN IWVAVG.
15. *Орлов Н.В., Амосова Л.Н.* Возведение фундаментов в сейсмически опасных районах // *Ползуновский альманах*. 2023. № 2–2. С. 66–68. EDN XEUCSP.
16. *Rezaeian S., Der Kiureghian A.* Simulation of synthetic ground motions for specified earthquake and site characteristics // *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2010. Vol. 39. Issue 10. Pp. 1155–1180. DOI: 10.1002/eqe.997
17. *Cacciola P.* A stochastic approach for generating spectrum compatible fully nonstationary earthquakes // *Computers & Structures*. 2010. Vol. 88. Issues 15–16. Pp. 889–901. DOI: 10.1016/j.compstruc.2010.04.009
18. *Ghaffarzadeh H.* Generation of Spatially Varying Ground Motion Based on Response Spectrum using Artificial Neural Networks // *International Journal of Science and Engineering Investigations*. 2015. Vol. 4. Issue 38. Pp. 233–242.
19. *Mkrtychev O.V., Lokhova E.M., Tagirov T.A.* Rating the limiting shift of a story as a criteria for a special limiting state // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024. Vol. 20. Issue 4. Pp. 197–207. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-4-197-207. EDN FEWUGT.
20. *Колотовичев Ю.А., Усков В.И.* Разложение динамической реакции высотных зданий на элементарные составляющие // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2025. № 3 (320). С. 42–54. DOI: 10.37538/0039-2383.2025.3.42.54. EDN FBCSCG.

Поступила в редакцию 6 марта 2026 г.

Принята в доработанном виде 8 апреля 2026 г.

Одобрена для публикации 13 апреля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Олег Вартанович Мкртычев — доктор технических наук, профессор; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; mkrtychev@yandex.ru;

Тимур Алиханович Тагиров — преподаватель; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; tagirovv_timur@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Aznaw G. Advances in Seismic Design for High-Rise Buildings : a Systematic Review of New Techniques and Materials. *American Journal of Civil Engineering*. 2025; 13(2):81-95. DOI: 10.11648/j.ajce.20251302.13. EDN RSRAIL.
2. Zhao X., Xu Q. The role of nonlinear dynamic analysis in seismic design for tall buildings: Challenges and limitations. *Journal of Structural Engineering*. 2020; 146(12):04020193. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002597
3. Zhang Li., Xue S., Zhang R., Xie L., Hao L. Simplified multimode control of seismic response of high-rise chimneys using distributed tuned mass inerter systems (TMIS). *Engineering Structures*. 2021; 228:111550. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111550. EDN FJXBSZ.
4. Mkrtychev O.V., Tagirov T.A., Lokhova E.M. Response of a high-rise building to a representative set of accelerograms. *Industrial and Civil Engineering*. 2025; 1:14-19. DOI: 10.33622/0869-7019.2025.01.14-19. EDN ISEUPI. (rus.).
5. Fernando F., Sahputra D.E., Fatchurrohman N. Performance Analysis of Regular and Irregular Horizontal Multi-Story Buildings Structure. *Indonesian Journal of Computing, Engineering and Design*. 2025; 7(2):144-152. DOI: 10.35806/ijoced.v7i2.554. EDN PDTRKD.
6. Bolotin V.V. *Statistical Methods in Structural Mechanics*. Moscow, Stroyizdat, 1961; 203. (rus.).
7. Reshetov A.A., Lokhova E.M. Assessment of the Influence of the Rotational Components of Seismic Action on the Sss of a Multistorey Reinforced Concrete Building. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022; 18(1):82-91. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-82-91. EDN ESREAB.
8. Bulushev S.V., Dudareva M.S. Nonlinear models of reinforced concrete beam elements with the actual reinforcement. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020; 032040. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032040. EDN UXIHWN.
9. Tyapin A.G. Combined asymptotic method in seismic analysis of high-rise building: specifics of low-frequency structure. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2018; 6:19-24. EDN YTXRUT. (rus.).
10. Qiao F., Bo J., Chang Ch., Wang L., Shen Ch. Comparative Study of the Seismic Response Characteristics of Three Special Soils. *Applied Sciences*. 2023; 13(20): 11375. DOI: 10.3390/app132011375. EDN XSIXNP.
11. Aptikaev F.F. Influence of Soil Conditions on Seismic Action Characteristics. *II Laverov Readings Arctic: Current Problems and Challenges : Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation*. 2023; 174-176. EDN FLEWCM. (rus.).
12. Sharapov D.A., Gebre T.H., Ali Yu.M. The effect of story drift in a multi-story building under the influence of an earthquake. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021; 17(3):270-277. DOI: 10.22363/1815-5235-2021-17-3-270-277. EDN AUUGMZ.
13. 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.).
14. Merkuryev Yu.S. Modeling seismic impact on substrate with a damping layer. Comparison of analytical and finite element methods. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2023; 4(60): 122-134. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-4-122-134. EDN IWVAVG. (rus.).
15. Orlov N.V., Amosova L.N. Construction of Foundations in Seismically Hazardous Areas. *Polzunovsky Almanac*. 2023; 2-2:66-68. EDN XEUCCP. (rus.).
16. Rezaeian S., Der Kiureghian A. Simulation of synthetic ground motions for specified earthquake and site characteristics. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2010; 39(10):1155-1180. DOI: 10.1002/eqe.997
17. Cacciola P. A stochastic approach for generating spectrum compatible fully nonstationary earthquakes.

Computers & Structures. 2010; 88(15-16):889-901. DOI: 10.1016/j.compstruc.2010.04.009

18. Ghaffarzadeh H. Generation of Spatially Varying Ground Motion Based on Response Spectrum using Artificial Neural Networks. *International Journal of Science and Engineering Investigations*. 2015; 4(38): 233-242.

19. Mkrtychev O.V., Lokhova E.M., Tagirov T.A. Rating the limiting shift of a story as a criteria for a spe-

cial limiting state. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024; 20(4): 197-207. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-4-197-207. EDN FEWUGT.

20. Kolotovichev Yu.A., Uskov V.I. Singular decomposition of high-rise building dynamic response. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2025; 3(320):42-54. DOI: 10.37538/0039-2383.2025.3.42.54. EDN FBCSCG. (rus.).

Received March 6, 2026.

Adopted in revised form on April 8, 2026.

Approved for publication on April 13, 2026.

B I O N O T E S: **Oleg V. Mkrtychev** — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; mkrtychev@yandex.ru;

Timur A. Tagirov — lecturer; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; tagirovv_timur@mail.ru.

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

The authors declare no conflicts of interest.

Комплексная оценка систем материалов для штукатурной отделки фасадов кирпичных зданий

Роман Алексеевич Майер¹, Нина Николаевна Шангина¹,
Алексей Михайлович Харитонов²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I (ПГУПС); г. Санкт-Петербург, Россия;

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет (СПбГАСУ); г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время эксплуатируется большое количество кирпичных зданий, штукатурные фасады которых требуют периодического ремонта. Рассматривается проблема недостаточной долговечности фасадной отделки, так как ее выход из работоспособного состояния зачастую происходит значительно раньше истечения предусмотренных межремонтных сроков. Одной из ключевых причин преждевременного разрушения отделки является несовместимость технических свойств кирпичной кладки, штукатурного и красочного слоев, что проявляется в композиционной неустойчивости системы материалов, под влиянием циклических климатических факторов. Реализация комплексного подхода при формировании требований к отделке, определяющих работу фасадных материалов и основания как единой системы, представляется одним из важнейших направлений решения указанной проблемы. Цель исследования заключается в обосновании критериев и метода выбора систем отделки на основе обеспечения химической и физико-механической совместимости материалов с учетом воздействия на них эксплуатационных факторов. Представлен первый этап исследований, заключающийся в экспериментальном определении степени влияния вида вяжущего штукатурных растворов, а также наличия в системе грунтовочных и окрасочных составов на один из основных критериев выбора отделочной системы — паропроницаемость.

Материалы и методы. Критически важным критерием совместимости отделки и основания представляется сопоставимость величин паропроницаемости. Приведены результаты исследования паропроницаемости штукатурных систем отделки, отличающихся видом вяжущего, а также используемыми способами выравнивания под окраску.

Результаты. Показано, что применение накрывочных штукатурных слоев взамен шпаклевочных способствует повышению паропроницаемости и достижению значений, присущих кирпичной кладке. Выявлено, что применение гидрофобизатора в составе силикатной краски не оказывает значительного влияния на паропроницаемость, что может быть использовано при необходимости для систем с водоотталкивающими свойствами.

Выводы. Предложен подход к выбору материалов для штукатурной отделки фасадов кирпичных зданий на основе комплексной оценки совместимости. Разработаны предварительные рекомендации по подбору отделочных систем по критерию паропроницаемости, направленные на увеличение надежности эксплуатации фасадов и снижение затрат на ремонтные работы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: штукатурная отделка, кирпичные фасады, паропроницаемость, система отделочных материалов, долговечность штукатурки, комплексная оценка, силикатная краска

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Майер Р.А., Шангина Н.Н., Харитонов А.М. Комплексная оценка систем материалов для штукатурной отделки фасадов кирпичных зданий // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 7. С. 1148–1157. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1148-1157

Автор, ответственный за переписку: Роман Алексеевич Майер, maier@agiogk.ru.

Comprehensive assessment of material systems for plaster finishing of brick building facades

Roman A. Mayer¹, Nina N. Shangina¹, Alexey M. Kharitonov²

¹ Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS); St. Petersburg, Russian Federation;

² Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. There are currently a large number of brick buildings in use, the plastered facades of which require periodic repair. This paper examines the problem of the insufficient durability of façade cladding, as it often ceases to be serviceable well before the end of the specified intervals between repairs. One of the key causes of premature deterioration of the finish is the incompatibility of the technical properties of the brickwork, plaster, and paint layers, which manifests as

the compositional instability of the material system under the influence of cyclic climatic factors. Implementing a comprehensive approach in formulating requirements for finishing, which define the operation of facade materials and the base as a single system, appears to be one of the most important directions for solving the stated problem. The main objective of the research is to justify the criteria and method for selecting finishing systems based on ensuring chemical and physico-mechanical compatibility of materials, taking into account the operating factors affecting them. The article considers the first stage of the study, which consists of experimentally determining the extent to which the type of binder in plaster mortars, as well as the presence of primer and paint components in the system, influence one of the key criteria for choosing a finishing system — the vapour permeability.

Materials and methods. The critically important criterion of compatibility between finish and base is the comparability of vapour permeability values. The study presents results on the vapour permeability of plaster finishing systems that differ by the type of binder and by the methods used to prepare the surface for painting.

Results. It is shown that applying finishing plaster layers instead of putty increases vapour permeability and achieves values characteristic of brickwork. It was found that the use of a hydrophobic additive in silicone paint does not significantly affect vapour permeability, which may be used, if necessary, for systems with water-repellent properties.

Conclusions. A methodology for selecting materials for plaster facade finishes of brick buildings based on a comprehensive assessment of compatibility is proposed. Preliminary recommendations for selecting finishing systems based on the vapour permeability criterion are developed, aimed at increasing facade reliability and reducing repair costs.

KEYWORDS: plaster finish, brick facades, vapour permeability, finishing material system, durability of plaster, comprehensive assessment, silicate paint

FOR CITATION: Mayer R.A., Shangina N.N., Kharitonov A.M. Comprehensive assessment of material systems for plaster finishing of brick building facades. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(7): 1148-1157. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1148-1157 (rus.).

Corresponding author: Roman A. Mayer, maier@agiogk.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В практике отделки кирпичных фасадов широко распространены разнообразные штукатурные системы, применение которых все чаще сталкивается с проблемой их недостаточной эксплуатационной надежности. В этой связи важно отметить, что требования по межремонтному сроку для оштукатуренных фасадов предусмотрены только в ведомственных нормах, введенных в действие еще в 1989 г., согласно которым данный период составляет 30 лет [1]. В более поздних нормативных документах подобных требований не имеется. Учитывая, что региональная программа капитального ремонта многоквартирных жилых домов формируется, как правило, на период 25 лет, можно утверждать, что система штукатурной отделки фасадов должна сохранять работоспособность в течение указанного срока. На практике большинство фасадов требуют ремонтного вмешательства уже через 5–7 лет эксплуатации, что приводит к значительному росту общих затрат на содержание зданий и ухудшению архитектурного облика застройки [2–4].

Недостаточная долговечность результатов ремонтных работ, по мнению авторов, связана с отсутствием научно обоснованных рекомендаций по формированию отделочных систем, адаптивных к нестационарным условиям окружающей среды, на основе учета особенностей кирпичного основания и совместимости материалов [5, 6]. Такие системы должны сохранять работоспособность при изменении в широком диапазоне климатических факторов, что приобретает особую актуальность в последнее время из-за участвовавших случаев погодных аномалий [7–9].

Требования к системам материалов для отделки фасадов

Анализ нормативной базы показывает, что в части выбора отделочных материалов отсутствуют

указания, относящиеся к обеспечению надежной совместной работы системы «кирпичная кладка – штукатурные слои – окраска». Каждый элемент данной системы имеет свои физико-механические свойства, также большое значение приобретают граничные зоны между слоями [9–11]. Отсутствие регламентации этих аспектов при выборе отделочных материалов создает существенные риски для проектирования и эксплуатации фасадных систем.

Следует отметить, что существует серия нормативных документов, определяющих необходимые характеристики отдельных элементов системы отделочных материалов. Наиболее полными с точки зрения выполнения работ по устройству отделки являются СП 71.13330.2017 «Изоляционные и отделочные покрытия» и ГОСТ Р 57984–2017 «Штукатурка для наружных и внутренних работ». Эти документы содержат требования по подготовке оснований, подбору, приготовлению и нанесению штукатурных растворов, а также методы оценки качества проведенных работ, но они не направлены на формирование надежной совместной работы системы исходя из учета физико-механических свойств кладки, отделочных материалов и условий эксплуатации.

При всей очевидности влияния на долговечность отделки таких показателей, как паропроницаемость, соотношение прочностных характеристик, водопоглощение и т.п., на сегодняшний день отсутствует единый метод подбора систем материалов, опирающийся на закономерности взаимодействия между собой отделочных слоев и основания, обусловленных различиями значений указанных показателей.

На практике все вышесказанное приводит, например, к тому, что при оштукатуривании кирпичных стен зачастую применяют плотные высокопрочные цементные штукатурки с низким показателем паро-

проницаемости [1–3, 12]. Результаты стандартных испытаний подобных составов на прочность сцепления с основанием и морозостойкость контактной зоны характеризуются высокими значениями показателей, но уже через сезон эксплуатации отделка отслаивается с разрушением поверхностного слоя кладки [7, 13].

Разработка метода выбора системы отделочных материалов, основанная на комплексной оценке взаимодействия элементов данной системы между собой и основанием в условиях воздействия эксплуатационных факторов, позволит существенно повысить долговечность результатов по устройству или ремонту штукатурной отделки фасадов кирпичных зданий.

В настоящей статье представлены предлагаемые методологические подходы по оценке совместимости материалов по отдельным параметрам, что является одним из важнейших этапов процедуры выбора системы.

Конденсационная влага, накапливающаяся в ограждающей конструкции, — наиболее частая причина разрушения отделки. Поэтому высокая паропроницаемость отделки служит одним из важнейших факторов обеспечения ее долговечности [14–16]. Исходя из этого, на первом этапе разработки методов комплексной оценки были проведены испытания на определение паропроницаемости различных систем отделочных материалов.

Паропроницаемость кладок не нормируемая величина и может варьироваться в зависимости от вида кирпича и раствора, но очевидно, что для предотвращения накопления влаги в конструкции сопротивление паропропусканию отделки должно быть меньше, чем у кладки. Известно, что коэффициент паропроницаемости традиционных кирпичных кладок находится в диапазоне 0,11–0,15 мг/(м·ч·Па) [10, 16–19], поэтому система отделки должна характеризоваться сопоставимыми значениями.

Системы отделки, основанные на известковых штукатурках, обладают наибольшими величинами паропроницаемости [1–11]. Данные системы долгое время повсеместно использовались для отделки кирпичных фасадов, но сегодня практически полностью вытеснены из практики применения цементными растворами [14]. Это стало следствием стремления ускорить твердение штукатурных слоев, увеличить их прочность и водостойкость. Негативные последствия применения плотных и прочных цементных растворов в настоящее время стали очевидны. Они выражены в отслоении отделки ввиду ее избыточной прочности и разрушении кирпича из-за его увлажнения из-за чрезмерно низкой паропроницаемости штукатурных растворов [1–3, 20].

Поэтому использование извести в качестве вяжущего для штукатурных растворов необходимо для обеспечения паропроницаемости [7, 13], но обеспечение повышенной прочности и водостойкости слоев отделки остается актуальной задачей. Реализо-

вать указанное сочетание свойств возможно путем использования известково-пущолоановых, известково-цементных и цементно-известковых вяжущих.

Таким образом, основная задача исследования заключается в разработке метода комплексной оценки совместимости материалов фасадной отделки с учетом воздействия на них эксплуатационных факторов с целью повышения долговечности фасадной отделки и снижения расходов на ремонт за счет обеспечения стабильной работоспособности. На первом этапе исследования экспериментально определялась степень влияния вида вяжущего штукатурных растворов, а также наличия в системе грунтовочных и окрасочных составов на один из основных критериев формирования отделочной системы — паропроницаемость.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходя из вышесказанного, для исследований паропроницаемости были выбраны шесть систем штукатурной отделки, представленные в табл. 1.

В качестве основы данных систем (выравнивающего штукатурного слоя) выступают следующие составы:

- традиционный известковый штукатурный раствор;
- модифицированный пущолоановой добавкой известковый раствор;
- цементно-известковый раствор.

В качестве финишного покрытия приняты как накрывочные штукатурные составы, придающие шероховатую фактуру, так и тонкодисперсные шпатлевки, обеспечивающие гладкое финишное покрытие. Вяжущее в накрывочном составе соответствует тому, что использовано в штукатурной основе рассматриваемой системы.

Толщина штукатурного выравнивающего слоя образцов составляет 20 ± 2 мм, толщина накрывочных слоев — 4 ± 1 мм. Шпаклевочные составы нанесли слоем 2 ± 1 мм. Размеры образцов в плане — 100×100 мм.

Высокое значение в системе отделки имеют лакокрасочные покрытия. Исходя из требований обеспечения повышенной паропроницаемости, в настоящей работе использовались силикатная краска и грунтовка. Важным их преимуществом является присущая им реакционная способность по отношению к известковым растворам, обуславливающая высокую адгезию с основанием и формирование прочного минерального покрытия, стойкого к биоповреждениям [17, 19].

Для определения степени влияния различных способов устройства окрасочного покрытия готовились серии образцов, отличающиеся количеством и видом слоев лакокрасочных материалов. Исходя из этого внутри каждой системы сформированы по четыре подсистемы (табл. 1). Каждая отдельная подсистема представлена тремя образцами.

Табл. 1. Виды оснований и покрытий образцов для проведения испытаний

Table 1. Types of substrates and coatings of specimens for testing

Номер системы System number	Штукатурные слои Plaster layers		Подсистема Subsystem	Окрасочный слой Painting layer
	Выравнивающий слой Leveling layer	Накрывочный слой The covering layer		
1	КК KK	КН KN	a	–
			b	СГ/ SG
			c	СГ + СК / SG + SK
			d	СГ + СК(ГФ) / SG + SK(GF)
2	КК KK	ФИ FI	a	–
			b	СГ / SG
			c	СГ + СК / SG + SK
			d	СГ + СК(ГФ) / SG + SK(GF)
3	ОК OK	ОН ON	a	–
			b	СГ / SG
			c	СГ + СК / SG + SK
			d	СГ + СК(ГФ) / SG + SK(GF)
4	ОК OK	ФИ FI	a	–
			b	СГ / SG
			c	СГ + СК / SG + SK
			d	СГ + СК(ГФ) / SG + SK(GF)
5	ЦИ CI	ЦИФ CIF	a	–
			b	СГ / SG
			c	СГ + СК / SG + SK
			d	СГ + СК(ГФ) / SG + SK(GF)
6	ЦИ CI	ФЦ FC	a	–
			b	СГ / SG
			c	СГ + СК / SG + SK
			d	СГ + СК(ГФ) / SG + SK(GF)

Примечание: КК — смесь сухая штукатурная, крупнозернистая, известковая «Рунит классическая крупная»; КН — смесь сухая штукатурная накрывочная, мелкозернистая, известковая «Рунит классическая накрывочная (финишная)»; ОК — смесь сухая штукатурная, крупнозернистая, известковая, с пуццолановой добавкой «Рунит оригинальная крупная»; ОН — смесь сухая штукатурная накрывочная, известковая, с пуццолановой добавкой «Рунит оригинальная накрывочная (финишная)»; ЦИ — смесь сухая штукатурная, крупнозернистая, цементно-известковая «Рунит цементно-известковая»; ЦИФ — смесь сухая штукатурная, мелкозернистая, цементно-известковая «Рунит финишная»; ФИ — смесь сухая шпаклевочная, тонкодисперсная, известково-пуццолановая «Рунит универсальная»; ФЦ — смесь сухая шпаклевочная, тонкодисперсная цементная «Рунит шпаклевка белая»; СГ — состав силикатный отделочный строительный «Рунит силикат-грунт», разбавление водой в соотношении 1:1; СК — состав силикатный отделочный строительный «Рунит силикатная краска»; СК(ГФ) — «Рунит силикатная краска», в состав которой вводился 1 % гидрофобизирующей добавки BS136.

Note: KK — dry plaster mix, coarse-grained, lime-based “Runit Classic Coarse”; KN — dry plaster finishing mix, fine-grained, lime-based “Runit Classic Finishing”; OK — dry plaster mix, coarse-grained, lime-based with pozzolanic additive “Runit Original Coarse”; ON — dry plaster finishing mix, lime-based with pozzolanic additive “Runit Original Finishing”; CI — dry plaster mix, coarse-grained, cement-lime “Runit Cement-Lime”; CIF — dry plaster finishing mix, fine-grained, cement-lime “Runit Finishing”; FI — dry putty mix, fine-dispersed, lime-pozzolanic “Runit Universal”; FC — dry putty mix, fine-dispersed cement-based “Runit White Putty”; SG — silicate finishing construction composition “Runit Silicate Primer”, diluted with water at a ratio of 1:1; SK — silicate finishing construction composition “Runit Silicate Paint”; SK(GF) — “Runit Silicate Paint” containing 1 % hydrophobic additive BS136.

Учитывая прикладной характер выполняемых исследований и необходимость проведения натурных оценок принятых систем, в качестве отделочных материалов было решено использовать составы, выпускаемые серийно и широко применяемые на кирпичных фасадах. Указанным условиям удовлетворяют сухие строительные смеси и лакокрасочные материалы, производимые под торговой маркой «РУНИТ», номенклатура которых позволяет сформировать выбранные для изучения системы отделки. Основные характеристики примененных материалов представлены в табл. 2.

Табл. 2. Характеристики использованных в исследовании материалов

Table 2. Characteristics of materials used in the study

Наименование материала Name of material	Прочность при сжатии, МПа Compressive strength, MPa	Марка по морозостойкости Frost resistance grade	Плотность растворной смеси (ЛКМ), кг/м³ Density of mortar mix (LCM), kg/m³	Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па) Vapour permeability, mg/(m·h·Pa)
Рунит классическая крупная Runit Classic Coarse	1,2	–	1640	0,182
Рунит оригинальная крупная Runit Original Coarse	2,5	F25	1685	0,175
Рунит цементно-известковая Runit Cement-Lime	5,8	F35	1690	0,143
Рунит классическая накрывочная (финишная) Runit Classic Finishing	0,6	–	1590	0,134
Рунит оригинальная накрывочная (финишная) Runit Original Finishing	1,0	–	1660	0,136
Рунит финишная Runit Finishing	5,3	F35	1680	0,119
Рунит универсальная Runit Universal	3,0	–	1600	0,105
Рунит шпаклевка белая Runit White Putty	6,3	F75	1610	0,098
Рунит силикат-грунт Runit Silicate Primer	–	–	1130	–
Рунит силикатная краска Runit Silicate Paint	–	–	1625	–

Испытание на паропроницаемость проводилось методом «мокрой чашки» по ГОСТ 25898–2020. Для проведения исследования использовалась климатическая испытательная камера «Тепло-Влага М 0/100-80 КТВ» при поддержании в камере постоянной температуры 23 °С и влажности 50 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Средние значения паропроницаемости исследованных образцов подсистем представлены в табл. 3 и в графическом виде отражены на рисунке.

В системах на основе традиционного известкового штукатурного раствора применение для выравнивания под окраску известковой накрывочной штукатурки позволяет повысить общую паропроницаемость системы на 15 % по сравнению с использованием известково-пущолановой шпаклевки.

В случае применения известково-пущолановой шпаклевки для выравнивания под окраску крупнозернистого известкового раствора с пущолановой добавкой общая паропроницаемость системы

на 13 % ниже, чем при использовании накрывочной известковой штукатурки, модифицированной пущолановой добавкой.

Увеличение паропроницаемости на 17 % системы отделки на основе цементно-известкового штукатурного раствора достигается за счет использования для финишного выравнивания цементно-известковой накрывочной штукатурки вместо цементной шпаклевки.

Для облегчения оценки степени влияния на проницаемость отделки грунтовочных, окрасочных слоев, а также наличия гидрофобизирующей добавки в краске выполнено ранжирование систем по убыванию величины коэффициента паропроницаемости:

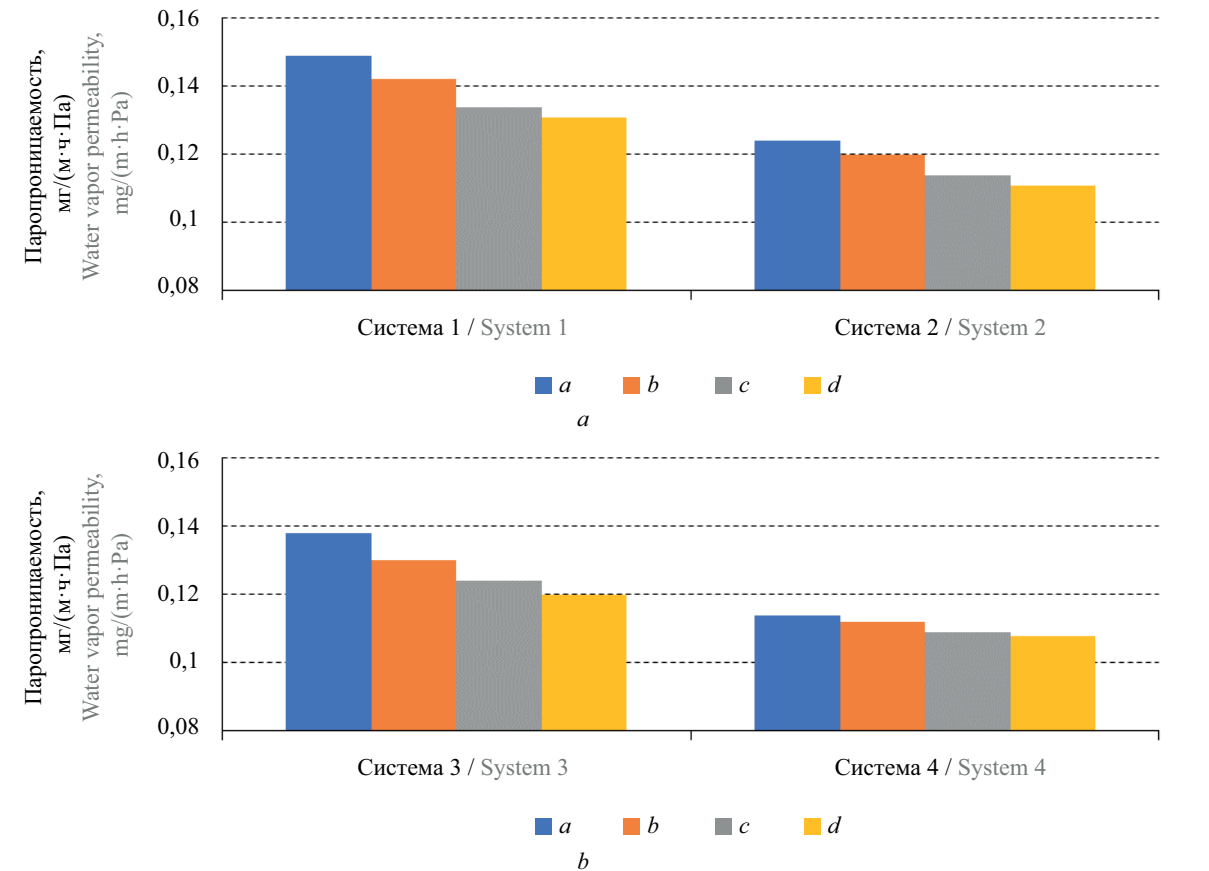
- система 1 (крупнозернистая и накрывочная известковые штукатурки) — 0,131 мг/(м·ч·Па), наибольшее значение;
- система 3 (крупнозернистая и накрывочная известковые штукатурки с пущолановой добавкой) — 0,120 мг/(м·ч·Па), снижение относительно наибольшего значения на 8 %;

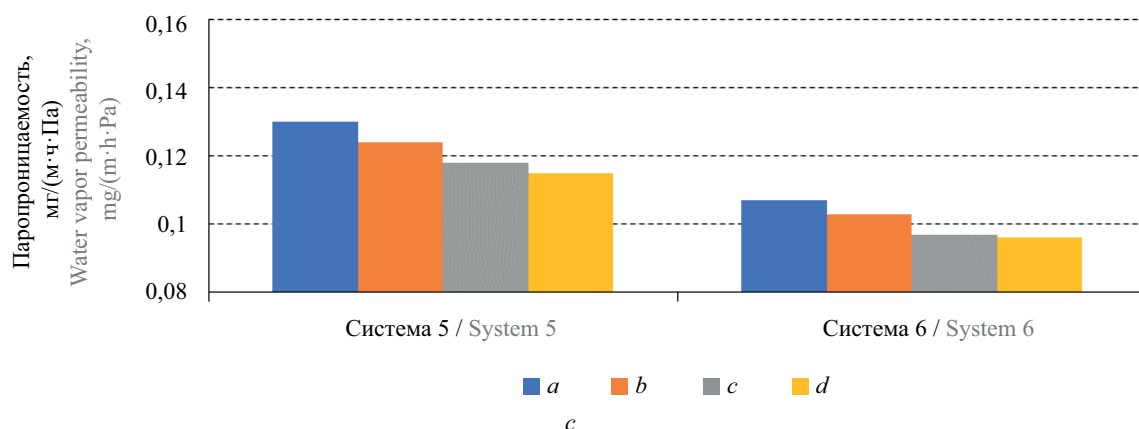
Табл. 3. Результаты проведения испытаний на паропроницаемость

Table 3. Results of vapour permeability testing

Система материалов The material system	Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па), для подсистемы Vapour permeability, mg/(m·h·Pa), for the subsystem			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Система 1 (КК + КН) System 1 (KK + KN)	0,149	0,142	0,134	0,131
Система 2 (КК + ФИ) System 2 (KK + FI)	0,124	0,120	0,114	0,111
Система 3 (ОК + ОН) System 3 (OK + ON)	0,138	0,130	0,124	0,120
Система 4 (ОК + ФИ) System 4 (OK + FI)	0,114	0,112	0,109	0,108
Система 5 (ЦИ + ЦИФ) System 5 (CI + CIF)	0,130	0,124	0,118	0,115
Система 6 (ЦИ + ФЦ) System 6 (CI + FC)	0,107	0,103	0,097	0,096

- система 5 (крупнозернистая и накрывочная цементно-известковые штукатурки) — 0,115 мг/(м·ч·Па), снижение относительно наибольшего значения на 12 %;
 - система 2 (известковая штукатурка и известково-пуццолановая шпаклевка) — 0,111 мг/(м·ч·Па), снижение относительно наибольшего значения на 15 %;
 - система 4 (известковая штукатурка с пуццолановой добавкой и известково-пуццолановая шпаклевка) — 0,108 мг/(м·ч·Па), снижение относительно наибольшего значения на 18 %;
- система 6 (цементно-известковая штукатурка и цементная шпаклевка) — 0,096 мг/(м·ч·Па), наименьшее значение, снижение относительно наибольшего значения на 27 %.
- Закономерным является наибольшее значение паропроницаемости для системы на основе крупно-





Паропроницаемость образцов отделочных материалов систем: *a* — 1–2, выполненных по традиционному известковому штукатурному раствору; *b* — 3–4, выполненных по модифицированному пуццолановой добавкой известковому штукатурному раствору; *c* — 5–6, выполненных по цементно-известковому штукатурному раствору

Water vapour permeability of finishing materials specimens of systems: *a* — 1–2, made using traditional lime plaster mortar; *b* — 3–4, made using lime plaster mortar modified with pozzolanic additive; *c* — 5–6, made using cement-lime plaster mortar

зернистого известкового раствора с выравниванием под окраску мелкозернистым составом. Следует отметить, что применение шпаклевочных смесей взамен накрывочных существенно снижает паропроницаемость (на 15–25 %). Эта тенденция сохраняется для всех рассмотренных вариантов отделки. Поэтому система 5 на основе цементно-известкового раствора с накрывочным слоем превосходит по паропроницаемости систему 4, включающую известково-пуццолановый раствор и шпаклевочный состав на аналогичном виде вяжущего.

Во всех исследованных системах нанесение силикатной грунтовки сопровождается снижением проницаемости на 3–5 %, а силикатная краска дополнительно понижает паропроницаемость на 7–9 %. Использование в составе силикатной краски гидрофобизирующей добавки незначительно уменьшает величину проницаемости (не более чем на 2 %).

Условию совместимости с кладкой по величине паропроницаемости (0,11–0,15 мг/(м·ч·Па)) удовлетворяют системы 1–5. Система 6, в которой в качестве финишного выравнивающего покрытия использован цементный шпаклевочный состав, обладает недостаточной проницаемостью для водяных паров и может способствовать накоплению влаги в ограждающей конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Количественное сравнение результатов испытания подсистем, отличающихся видом материала для финишного выравнивания под окраску, позволяет утверждать, что применение накрывочного штукатурного раствора взамен шпаклевочного состава способствует значительному повышению паропроницаемости системы. Данный эффект согласуется

с представлениями о влиянии толщины и структуры финишных слоев на диффузионное сопротивление систем. Одновременно установлено, что введение гидрофобизирующей добавки в состав силикатной краски практически не изменяет общую паропроницаемость системы. Это обуславливает возможность применения подобных решений для уменьшения поверхностного водопоглощения отделки без заметного снижения массопереноса влаги из ограждающей конструкции в окружающую среду.

Важно подчеркнуть, что паропроницаемость является лишь одной из ключевых характеристик совместимости штукатурной системы с кирпичным основанием. Результаты экспериментов и литературные данные показывают, что долговечность и работоспособность отделки определяются комплексом критериев: стойкостью к поверхностному и капиллярному водопоглощению, деформативно-механическими свойствами (прочностью на сжатие и растяжение при изгибе, модулем упругости), морозостойкостью, а также особенностями структуры контактных зон «кирпич – штукатурка», «штукатурка – лакокрасочное покрытие». Неоднородность этих характеристик в системе материалов приводит к концентрации напряжений, образованию трещин, отслоениям и ускоренной деградации покрытия даже при формальном соблюдении требований по паропроницаемости.

В этой связи целесообразно рассматривать паропроницаемость не как самостоятельный критерий выбора штукатурной системы, а как один из элементов комплексной оценки, включающей анализ влагопереноса, водопоглощения, механических свойств, а также климатических воздействий и режима эксплуатации ограждающих конструкций. На следующих этапах исследования предполагается установить

влияние этих критериев, а также определить оптимальный метод расчета интегрального показателя эффективности системы отделочных материалов.

Предложенный подход к анализу многослойных систем по представленным критериям позволит выявлять сочетания материалов, обеспечивающих со-

вместимость с кирпичным основанием и повышение эксплуатационного ресурса фасадной отделки. Дальнейшие результаты работы могут быть использованы при разработке нормативных требований и рекомендаций по проектированию и ремонту штукатурных фасадных систем для кирпичных зданий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Медяник Ю.В. Классификация и анализ дефектов и повреждений штукатурных покрытий фасадов зданий // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 2 (44). С. 231–238. EDN XQCNNB.
2. Орлович Р.Б., Горшков А.С., Шангина Н.Н., Харитонов А.М. Причины и механизмы повреждения штукатурного покрытия фасадов исторических каменных зданий // Социология города. 2023. № 2. С. 59–77. DOI: 10.35211/19943520_2023_2_59. EDN OAJHLR.
3. Шангина Н.Н., Харитонов А.М., Корниенко С.В., Ольшевский В.Я., Еникеев А.И., Фомин С.Н. и др. Влияние типа наружного штукатурного покрытия на температурно-влажностные характеристики однородных каменных стен // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. № 1 (98). С. 407–417. DOI: 10.35211/18154360_2025_1_407. EDN ARSNDZ.
4. Drdác M., Ševčík R., Frankeová D., Koudelková V., Buzek J., Eisler M. et al. Degradation Mechanisms of Mortar and Plaster Layers // Materials. 2024. Vol. 17. Issue 14. P. 3419. DOI: 10.3390/ma17143419. EDN LHKDJD.
5. Логанина В.И. Известковые сухие строительные смеси для реставрации и отделки зданий и сооружений : монография. Пенза : ПГУАС, 2015. 320 с. EDN XYXZZZ.
6. Куприянов В.Н. Оценка и регулирование конденсации водяного пара в ограждающих конструкциях // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. № 1 (59). С. 29–40. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_29. EDN UOGVHQ.
7. Шангина Н.Н., Харитонов А.М., Корниенко С.В., Ольшевский В.Я., Фомин С.Н., Горшков А.С. Сравнительный анализ комплекса тепловлагофизических свойств цементного и известкового штукатурных растворов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. № 2 (99). С. 67–76. DOI: 10.35211/18154360_2025_2_67. EDN IEEUUK.
8. Горшков Р.А., Корниенко С.В. Влияние климата и наружной штукатурки на влажностный режим каменных стен // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 6. С. 971–981. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.971-981. EDN MATOQI.
9. Петров А.С., Куприянов В.Н. Влияние температурно-влажностных условий эксплуатации строительных материалов на их паропроницаемость // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 1 (31). С. 92–98. EDN TWRNAD.
10. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. М. : Стройиздат, 1979. 248 с.
11. Cascione V., Maskell D., Shea A., Walker P., Mani M. Comparison of moisture buffering properties of plasters in full scale simulations and laboratory testing // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 252. P. 119033. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119033. EDN VTRJXK.
12. Ustabas I., Cuce E. Thermal insulation and mechanical properties of a specially improved insulation plaster under freezing–thawing and high-temperature conditions // International Journal of Low Carbon Technologies. 2023. Vol. 18. Pp. 682–688. DOI: 10.1093/ijlct/ctad034. EDN SSUNNT.
13. Chan C.L., Zhang M. Effect of limestone on engineering properties of alkali-activated concrete : a review // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 362. P. 129709. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129709. EDN DKPQVZ.
14. Paralkar V., Damle R. Moisture buffering and mould growth characteristics of naturally ventilated lime plastered houses // UCL Open Environment. 2024. Vol. 6. Issue 1. DOI: 10.14324/111.444/ucloe.1988. EDN EZVANG.
15. La Russa M.F., Ruffolo S.A. Mortars and plasters — How to characterize mortar and plaster degradation // Archaeological and Anthropological Sciences. 2021. Vol. 13. Issue 10. DOI: 10.1007/s12520-021-01405-1. EDN HMNRUK.
16. Šadauskienė J., Šeduikytė L. Moisture accumulation in renovated external walls // Proceedings of the International Conference “Innovative Materials, Structures and Technologies”. 2014. P. 151. DOI: 10.7250/iscconstrs.2014.25
17. Мажитов Е.Б. Золь-силикатная краска для отделки стен зданий : дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2021. 165 с.
18. Nenadálová Š., Balík L., Rydval M., Bittner T. Laboratory verification of water vapour permeability of plaster compositions // Procedia Engineering. 2016. Vol. 151. Pp. 50–57. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.364

19. Le C.M., Le T.H. The Study's Chemical Interaction of the Sodium Silicate Solution with Extender Pigments to Investigate High Heat Resistance Silicate Coating // *Journal of Analytical Methods in Chemistry*. 2021. Vol. 2021. Pp. 1–11. DOI: 10.1155/2021/5510193. EDN WGNBWF.

20. Posani M., Veiga R., de Freitas V.P. Thermal renders for traditional and historic masonry walls: Comparative study and recommendations for hygric compatibility // *Building and Environment*. 2023. Vol. 228. P. 109737. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109737. EDN TIZIHI.

Поступила в редакцию 26 сентября 2025 г.

Принята в доработанном виде 19 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 20 мая 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Роман Алексеевич Майер** — аспирант кафедры архитектурно-строительного проектирования; **Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС)**; 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 9; РИНЦ ID: 1308605; maier@agiogk.ru;

Нина Николаевна Шангина — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой архитектурно-строительного проектирования; **Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС)**; 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 9; РИНЦ ID: 477451, Scopus: 57194455166; shangina@agiogk.ru;

Алексей Михайлович Харитонов — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии строительных материалов и метрологии; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 465143, Scopus: 56789672400, ResearchID: AAG-7430-2020; haritonov@agiogk.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Medyanik Yu.V. Classification and analysis of defects and damages of plaster coatings of building facades. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2018; 2(44):231-238. EDN XQCNNB. (rus.).

2. Orlovich R.B., Gorshkov A.S., Shangina N.N., Kharitonov A.M. Causes and mechanisms of damage to facades plaster facing of the historical stone buildings. *Sociology of the City*. 2023; 2:59-77. DOI: 10.35211/19943520_2023_2_59. EDN OAJHLR. (rus.).

3. Shangina N.N., Kharitonov A.M., Kornienko S.V., Olshevsky V.Ya., Yenikeev A.I., Fomin S.N. et al. Influence of the type of plaster finishing on the thermal properties of brick building components. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2025; 1(98):407-417. DOI: 10.35211/18154360_2025_1_407. EDN ARSNDZ. (rus.).

4. Drdácý M., Ševčík R., Frankeová D., Koudelková V., Buzek J., Eisler M. et al. Degradation Mechanisms of Mortar and Plaster Layers. *Materials*. 2024; 17(14):3419. DOI: 10.3390/ma17143419. EDN LHKDJD.

5. Loganina V.I. *Lime dry building mixes for restoration and finishing of buildings and structures : monograph*. Penza, PGUAS, 2015; 320. EDN XYSXZZ. (rus.).

6. Kupriyanov V.N. Evaluation and regulation of water vapor condensation in enclosing structures. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2022; 1(59):29-40. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_29. EDN UOGVHQ. (rus.).

7. Shangina N.N., Kharitonov A.M., Kornienko S.V., Olshevsky V.Ya., Fomin S.N., Gorshkov A.S. Comparative analysis of the complex of thermal and moisture properties of cement and lime plaster mortars. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2025; 2(99):67-76. DOI: 10.35211/18154360_2025_2_67. EDN IEEUUK. (rus.).

8. Gorshkov R.A., Kornienko S.V. Influence of climate and external plaster on the humidity conditions of masonry walls. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(6):971-981. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.971-981. EDN MATOQI. (rus.).

9. Petrov A.S., Kupriyanov V.N. Influence of temperature and moist operating conditions of construction materials on their vapor permeability. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2015; 1(31):92-98. EDN TWRNAD. (rus.).

10. Bogoslovsky V.N. *Thermal regime of a building*. Moscow, Stroyizdat, 1979; 248. (rus.).

11. Cascione V., Maskell D., Shea A., Walker P., Mani M. Comparison of moisture buffering properties of plasters in full scale simulations and laboratory testing. *Construction and Building Materials*. 2020; 252:119033. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119033. EDN VTRJXK.

12. Ustabas I., Cuce E. Thermal insulation and mechanical properties of a specially improved insulation plaster under freezing–thawing and high-temperature

conditions. *International Journal of Low Carbon Technologies*. 2023; 18:682-688. DOI: 10.1093/ijlct/ctad034. EDN SSUNNT.

13. Chan C.L., Zhang M. Effect of limestone on engineering properties of alkali-activated concrete : a review. *Construction and Building Materials*. 2023; 362: 129709. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129709. EDN DKPQVZ.

14. Paralkar V., Damle R. Moisture buffering and mould growth characteristics of naturally ventilated lime plastered houses. *UCL Open Environment*. 2024; 6(1). DOI: 10.14324/111.444/ucloe.1988. EDN EZVAHG.

15. La Russa M.F., Ruffolo S.A. Mortars and plasters — How to characterize mortar and plaster degradation. *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2021; 13(10). DOI: 10.1007/s12520-021-01405-1. EDN HMNRUK.

16. Šadauskienė J., Šeduikytė L. Moisture accumulation in renovated external walls. *Proceedings of the International Conference “Innovative Materials,*

Structures and Technologies”. 2014; 151. DOI: 10.7250/isconstrs.2014.25

17. Mazhitov E.B. *Sol-silicate paint for wall finishing of buildings : diss. ... cand. of technical sciences*. Penza, 2021; 165. (rus.).

18. Nenadálová Š., Balík L., Rydval M., Bittner T. Laboratory verification of water vapour permeability of plaster compositions. *Procedia Engineering*. 2016; 151:50-57. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.364

19. Le C.M., Le T.H. The Study’s Chemical Interaction of the Sodium Silicate Solution with Extender Pigments to Investigate High Heat Resistance Silicate Coating. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*. 2021; 2021:1-11. DOI: 10.1155/2021/5510193. EDN WGNBWF.

20. Posani M., Veiga R., de Freitas V.P. Thermal renders for traditional and historic masonry walls: Comparative study and recommendations for hygric compatibility. *Building and Environment*. 2023; 228:109737. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109737. EDN TIZIHI.

Received September 26, 2025.

Adopted in revised form on March 19, 2026.

Approved for publication on May 20, 2026.

B I O N O T E S : **Roman A. Mayer** — postgraduate student of the Department of Architectural and Construction Design; **Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS)**; 9 Moskovsky prospect, St. Petersburg, 190031, Russian Federation; ID RSCI: 1308605; maier@agiogk.ru;

Nina N. Shangina — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Architectural and Construction Design; **Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS)**; 9 Moskovsky prospect, St. Petersburg, 190031, Russian Federation; ID RSCI: 477451, Scopus: 57194455166; shangina@agiogk.ru;

Alexey M. Kharitonov — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Technology of Building Materials and Metrology; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 465143, Scopus: 56789672400, ResearcherID: AAG-7430-2020; haritonov@agiogk.ru.

Authors’ contribution: all authors contributed equally to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Оптимизация четырехкомпонентного вяжущего с золами аграрной и строительной промышленности Ирака

Фарах Алаа Абдуламир Альваш¹, Александр Сергеевич Иноземцев¹,
Борис Игоревич Булгаков¹, Юлия Сергеевна Филимонова²

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

² Московский политехнический университет (МПУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование направлено на разработку и оптимизацию состава четырехкомпонентного вяжущего с использованием местного сырья Ирака. Целью являлось создание математической модели, описывающей влияние переменных факторов — соотношений компонентов добавок — на ключевые выходные параметры: прочность на сжатие и изгиб в возрасте 28 сут.

Материалы и методы. Материалами служили портландцемент ЦЕМ I 52,5Н, метакеолин (МК), зола-уноса (ЗУ) кирпичного производства и зола от сжигания финиковых косточек (ЗФК). Последний компонент представляет особый интерес для утилизации отходов в регионе. Образцы-балочки изготавливали из раствора по стандартной методике. Для оптимизации состава был применен метод ротatableльного центрального композиционного планирования, позволивший построить уравнения множественной регрессии второго порядка.

Результаты. Получены адекватные регрессионные модели, связывающие прочности при изгибе $R_{изг}$ и на сжатие $R_{ск}$ с двумя факторами: соотношениями ЗУ/МК и ЗФК/МК. Анализ показал, что максимальная прочность достигается при частичной замене цемента (10 % массы) смесью активных минеральных добавок. Оптимальное соотношение компонентов в этой смеси составляет МК:ЗУ:ЗФК = (55–60):10:(30–35).

Выводы. Установлено, что наилучшие механические свойства (прочность на сжатие 72,4 МПа и на изгиб 7,58 МПа) демонстрирует состав: 90 % портландцемента, 6 % метакеолина, 1 % золы-уноса и 3 % золы финиковых косточек. Таким образом, работа подтверждает возможность эффективного использования местных промышленных и аграрных отходов Ирака для создания высокопрочного многокомпонентного вяжущего.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: четырехкомпонентное вяжущее, зола финиковой косточки, зола-уноса, прочность на сжатие, прочность при изгибе, регрессионное уравнение, сырье Ирака

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Альваш Ф.А.А., Иноземцев А.С., Булгаков Б.И., Филимонова Ю.С. Оптимизация четырехкомпонентного вяжущего с золами аграрной и строительной промышленности Ирака // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 7. С. 1158–1167. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1158-1167

Автор, ответственный за переписку: Фарах Алаа Абдуламир Альваш, alwashfarah@gmail.com.

Optimization of a four-component binder using ash from Iraq's agricultural and construction industries

Farah Alaa Abdulameer Alwash¹, Aleksandr S. Inozemtcev¹,
Boris I. Bulgakov¹, Yuliya S. Filimonova²

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

² Moscow Polytechnic University; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The study aims to develop and optimize the composition of a four-component binder using locally sourced raw materials from Iraq. The goal was to create a mathematical model describing the influence of variable factors — additive component ratios — on key output parameters: compressive and flexural strength at 28 days of age.

Materials and methods. The materials used were Portland cement CEM I 52.5 N, metakaolin (MK), fly ash (FA) from brick production, and date kernel ash (DKA). The latter component is of particular interest for waste management in the region. Beam specimens were prepared from mortar using standard methods. To optimize the composition, a rotatable central composite planning (CCP) method was used, allowing the construction of second-order multiple regression equations.

Results. As a result, adequate regression models were obtained linking flexural R_{bend} and compressive R_{comp} strengths with two factors: the ratios of FA/MK and DKA/MK. The analysis showed that maximum strength is achieved with a partial replacement of cement (10 % of the mass) with a mixture of active mineral additives. The optimal ratio of components in this mixture is МК:ФА:ДКА = (55–60):10:(30–35).

Conclusions. It was found that the best mechanical properties (compressive strength of 72.4 МПа and flexural strength of 7.58 МПа) are demonstrated by a composition consisting of 90 % Portland cement, 6 % metakaolin, 1 % fly ash, and 3 %

date kernel ash. Thus, the study confirms the feasibility of effectively using local industrial and agricultural waste from Iraq to create a high-strength multi-component binder.

KEYWORDS: four-component binder, date kernel ash, fly ash, compressive strength, flexural strength, regression equation, Iraq's raw materials

FOR CITATION: Alwash F.A.A., Inozemtcev A.S., Bulgakov B.I., Filimonova Yu.S. Optimization of a four-component binder using ash from Iraq's agricultural and construction industries. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(7):1158-1167. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1158-1167 (rus.).

Corresponding author: Farah Alaa Abdulameer Alwash, alwashfarah@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Цемент после его изобретения в середине 20-х гг. XIX в. Джозефом Аспдином и Егором Герасимовичем Челиевым был и останется в обозримом будущем основным вяжущим веществом для получения бетонов и строительных растворов различного назначения. В наши дни из наиболее насыщенных сырьевых ресурсов, потребляемых человеческой цивилизацией, цемент занимает второе место после воды. Однако процесс его изготовления энергоемок и сопровождается выбросом в атмосферу большого количества углекислого газа [1]. На сегодняшний день производство цемента генерирует примерно 8 % ежегодных мировых выбросов CO₂ [2]. Поэтому актуален поиск различных путей снижения вредного воздействия получения цемента на окружающую среду, основными из которых являются разработка составов бесклинкерных «альтернативных» вяжущих и использование тонкодисперсных активных добавок как природного, так и техногенного происхождения, обладающих цементирующим действием, для частичной замены портландцемента в составе многокомпонентных вяжущих [3].

Альтернативные вяжущие представляют собой новое поколение вяжущих веществ. Эти ресурсосберегающие альтернативные цементы могут содержать отходы различных отраслей промышленности (металлургической, топливно-энергетической, химической, аграрной) в виде зол, шлаков, шлама и т.д. [4, 5]. Получение таких альтернативных вяжущих потребляет меньше энергии и сопровождается значительно меньшими выбросами углекислого газа по сравнению с традиционными цементами. В качестве примеров новых вяжущих веществ, являющихся альтернативой традиционному портландцементу, можно привести сульфоломинатный цемент, щелочно-шлаковое вяжущее, белитовый портландцемент, магнезиальные цементы, гидросиликатные цементы и др. [6, 7]. Одно из новых и интересных предложений альтернативного композиционного вяжущего — цемент на основе обожженной доломитовой глины и известняка с небольшой добавкой портландцементного клинкера и гипса, цементный камень которого обладает высокой прочностью и долговечностью [8, 9].

В строительных конструкциях зданий и сооружений материалы могут подвергаться разнообразным внутренним напряжениям: сжимающим, растягивающим, изгибающим, срезающим или крутящим.

Бетон, являющийся основным строительным материалом современности, как и все другие каменные материалы, природные и искусственные, обладает высокой прочностью на сжатие, но значительно меньшей к растягивающим усилиям. Исходя из этого строительные конструкции обычно проектируют таким образом, чтобы бетон в них воспринимал главным образом сжимающие нагрузки, а при необходимости восприятия растягивающих усилий конструкции армируют [10].

Ирак обладает почти неиспользуемыми ресурсами аграрных отходов, в том числе косточками плодов финиковых пальм. За последние годы средняя урожайность фиников в Ираке установилась на уровне примерно 5 т с гектара, что дает возможность производить около 650 000 т фиников в год¹. Результаты проведенных научных исследований говорят о том, что зола, получаемая путем их сжигания при температуре 600–800 °С с последующим мелким измельчением, благодаря своему химическому составу и, в первую очередь, содержанию аморфного кремнезема, обладает пуццоланической активностью и поэтому может быть использована в качестве активной минеральной добавки в бетоны и строительные растворы. Кроме того, подобный эффективный путь утилизации отходов переработки фиников, а также топливных зол будет способствовать защите окружающей среды в Ираке от загрязнения многотоннажными техногенными отходами, а также расширению сырьевой базы местной промышленности строительных материалов [11–13].

Предыдущие исследования показали, что золы уноса теплоэлектростанций, доменные шлаки, а также зола, образующаяся в результате сжигания рисовой шелухи, являются эффективными компонентами бесцементных вяжущих веществ, позволяющими получать геополимерные мелкозернистые бетоны с высокими эксплуатационными показателями [14].

Цель исследования — разработка и оптимизация четырехкомпонентного вяжущего, состоящего из портландцемента и оптимального сочетания тонкодисперсных добавок в виде метаксаолина, золы уноса (ЗУ) и золы финиковых косточек (ЗФК) (обладающих пуццоланической активностью и частич-

¹ Продовольственная и сельскохозяйственная организация ФАО ближе к концу // ФАОСТАТ: продукция растениеводства и животноводства. 2023. С. 384. DOI: 10.4060/cc8166en

но заменяющих портландцемент) и обладающего высокими прочностными показателями. Для этого использован метод математического планирования эксперимента, основная задача которого заключается в установлении зависимостей ключевых физико-механических свойств цементного камня (прочности на сжатие и на растяжение при изгибе) от состава и количества ключевых сырьевых компонентов [15]. При этом первостепенное значение имеют прочностные характеристики цементного камня бетона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования в соответствии с целью исследования является многокомпонентное вяжущее. В качестве предмета исследования определены зависимости влияния состава и соотношения основных компонентов вяжущего на механические свойства цементного камня. В качестве базовых компонентов состава четырехкомпонентного вяжущего были использованы:

- портландцемент ЦЕМ I 52,5 Н ($\rho = 3120 \text{ кг/м}^3$) производства иракского цементного завода «Таслужа» (ПЦ), соответствующий иракскому стандарту IQ.S 5:1984 Тип I² и ГОСТ 31108–2020³;
- стандартный полифракционный кварцевый песок для испытаний портландцемента (П) с размером зерен 0,08–2,0 мм, соответствующий требованиям ГОСТ 6139–2020⁴;
- высокоактивный метакраолин (МК) ($\rho = 2550 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_n = 350 \text{ кг/м}^3$) производства компании ООО «Синерго»;
- вода дистиллированная, соответствующая требованиям ГОСТ Р 58144–2018⁵.

Отличительной особенностью минеральной сырьевой базы Республики Ирак, как показано выше, служит наличие многотоннажных отходов строительной и аграрной промышленности. В связи с этим разработка и оптимизация многокомпонентного вя-

жущего выполнены с использованием местного сырья:

- механоактивированной золы путем помола в шаровой мельнице в течение 20 мин, ЗУ ($\rho = 2420 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_n = 860 \text{ кг/м}^3$), образовавшейся в результате сжигания твердого топлива при обжиге кирпичей на заводе «Аль-Нахраван» в Багдаде с удельной поверхностью $850 \text{ м}^2/\text{кг}$;
- золы, полученной в результате сжигания финиковых косточек, поступивших с фабрики по производству финиковой пасты в г. Вавилон Республики Ирак. Финиковые косточки сортировали, промывали и подвергали термической обработке для получения золы. Полученную ЗФК подвергали механической активации путем помола в шаровой мельнице в течение 20 мин. Удельная поверхность составила $1090 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Для определения прочностных показателей четырехкомпонентного вяжущего с целью оптимизации из каждого состава стандартного цементного раствора, состоящего из вяжущего и песка в соотношении 1:3 по массе при водовязущем отношении, равном 0,5, в соответствии с требованиями ГОСТ 30744–2001⁶ были изготовлены по три образца-балочки размером $40 \times 40 \times 160 \text{ мм}$, которые вначале были испытаны на изгиб, а потом их полученные половинки — на сжатие.

Оптимизацию состава четырехкомпонентного вяжущего проводили с использованием уравнений множественной регрессии второго порядка для двух факторов с помощью рототабельного центрального композиционного планирования (РЦКП) и компьютерной программы «Градиент».

Метод РЦКП позволяет получить более точное математическое описание за счет увеличения числа экспериментов в центре и некоторых специальных значений «плеча звезды» [16]. В качестве варьируемых факторов приняты соотношение золы-уноса и метакраолина, а также соотношение золы финиковой косточки и метакраолина, в составе многокомпонентного вяжущего, ЗУ/МК — X_1 и ЗФК/МК — X_2 соответственно. Основные уровни и интервалы варьирования выбраны в соответствии с табл. 1.

⁶ ГОСТ 30744–2001. Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка. М. : ГУПЦПП, 2001. 30 с.

Табл. 1. Основные уровни и интервалы варьирования факторов

Table 1. Basic levels and ranges of variation of factors

Фактор / Factor		Уровни варьирования фактора Levels of factor variation			Интервал варьирования Variation interval
Наименование Description	Обозначение Abbreviation	–1	0	+1	
ЗУ/МК / FA/MK	X_1	1,50	4,00	6,50	2,50
ЗФК/МК / DKA/MK	X_2	0,60	2,00	3,40	1,40

Табл. 2. Матрица планирования и соотношения компонентов в составе четырехкомпонентного вяжущего X_1

Table 2. Matrix planning and ratio of components in the composition of a four-component binder X_1

В виде переменных In the form of variables		В натуральном выражении In real terms		Содержание добавок, % Additive content, %		
X_1	X_2	X_1	X_2	МК / МК	ЗУ / FA	ЗФК / DKA
–1	–1	1,50	0,60	3,2	4,8	1,9
+1	–1	6,50	0,60	1,2	8,0	0,7
–1	+1	1,50	3,40	1,7	2,5	5,8
+1	+1	6,50	3,40	0,9	6,0	3,1
–1,41	0	0,46	2,00	2,9	1,3	5,8
+1,41	0	7,54	2,00	0,9	7,2	1,9
0	–1,41	4,00	0,02	2,0	8,0	0,04
0	+1,41	4,00	3,98	1,1	4,5	4,4
0	0	4,00	2,00	1,4	5,7	2,9

После проведения всех девяти опытов, измерения отклика Y и статистической обработки данных методом наименьших квадратов получены уравнения регрессии в виде:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{12}X_1X_2 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + \Omega, \quad (1)$$

где Y — целевая функция экспериментальной модели; $B_0, B_1, B_2, B_{12}, B_{11}$ и B_{22} — коэффициенты уравнения регрессии второго порядка; X_1, X_2 — входные факторы; Ω — случайная ошибка, которая влияет на неуправляемые переменные [17–19].

С помощью компьютерной программы «Градиент» была получена матрица РЦКП для двух факторов, представленная в табл. 2.

Важно, что при варьировании указанных факторов количество остальных компонентов фиксировалось и составляло на 1 м³: портландцемент — 465 кг, песок — 1535 кг, вода — 256 кг.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате ранее проведенных исследований было установлено, что для получения мелкозернистого бетона, обладающего наибольшей прочностью на сжатие, на основе двухкомпонентной вяжущей системы, состоящей из портландцемента и метаксаолина, оптимальной является замена в ее составе портландцемента метаксаолином в количестве 7,5–15 мас. % [20]. После проведения математической оптимизации полученных экспериментальных результатов выявлена замена 10 мас. % портландцемента метаксаолином, при которой уменьшение содержания клинкера в составе вяжущего полностью компенсировалось появлением дополнительных гидратных новообразований в виде гидроалюминатов кальция и главным образом низкоосновных гидросиликатов кальция [21], являющихся основными минералами, повышающими прочность цементного камня. В связи с этим уровень замены портландцемента в 10 % по массе смесью тонкодисперсных добавок установлен в каче-

стве основной границы для создания более сложного четырехкомпонентного вяжущего.

Результаты проведенных испытаний прочности при изгибе, представленные в табл. 3, 4, статистически обработаны с целью построения матрицы планирования эксперимента для расчета коэффициентов регрессии.

Ошибки дисперсии в соответствии с:

$$G_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum S_i^2}, \quad (2)$$

где $S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (y_{ij} - y_i^{\text{cp}})^2}{m-1}$, $m=3$ — количество параллельных измерений; $N=9$ — количество опытов; составило $G_{\text{расч}} = 0,235 < G_{\text{табл}} = 0,477$, что указывает на однородность дисперсии.

В соответствии с табл. 3.2 [22] значение t -критерия для числа степеней свободы $f=18$ и $\alpha=0,05$ составляет $t_{\text{табл}} = 2,101$. Тогда значение критерия Стьюдента t_{bj} для коэффициентов b_j уравнения регрессии:

$$t_{bj} = \frac{|b_j|}{S_{\text{св}}(b_j)}, \quad (3)$$

$$\text{где } S_{\text{св}}(b_j) = \sqrt{\frac{\sum S_i^2}{N^2 \cdot k}}.$$

Коэффициент b_j считается значимым, если выполняется условие:

$$t_{bj} \geq t_{\alpha}(f_2),$$

где $t_{\alpha}(f_2)$ — критическое значение распределения Стьюдента.

Для полученных результатов экспериментов, представленных в табл. 4, критерий значимости $t_{bj} > t_{\text{табл}} = 2,1$, т.е. все коэффициенты статистически значимы. Величина p -значений $< 0,0001$ подтверждает высокую статистическую значимость всех коэффициентов регрессии.

Табл. 3. Прочность при изгибе образцов, испытанных в возрасте 28 сут

Table 3. Bending strength of specimens tested at the age of 28 days

Номер состава (опыта) Composition No. (experiment)	В натуральном виде, % In natural form, %			y_i^{cp} / y_i^{av}	$\hat{y}$	$(y_i^{cp} - \hat{y})^2 \cdot 10^3$ $(y_i^{av} - \hat{y})^2 \cdot 10^3$	Ошибка дисперсии S_i^2 Dispersion error S_i^2
	МК MK	ЗУ FA	ЗФК DKA				
1	3,2	4,8	1,9	5,05	5,01	1,76	0,0010
2	1,2	8,0	0,7	6,79	6,76	0,58	0,0049
3	1,7	2,5	5,8	6,76	6,77	0,03	0,0021
4	0,9	6,0	3,1	6,59	6,61	0,53	0,0056
5	2,9	1,3	5,8	6,01	6,04	0,53	0,0080
6	0,9	7,2	1,9	7,17	7,17	0,02	0,0021
7	2,0	8,0	0,04	5,36	5,41	1,94	0,0017
8	1,1	4,5	4,4	6,56	6,54	0,58	0,0017
9	1,4	5,7	2,9	7,65	7,65	0,00	0,0084
Σ						5,95	0,0357

Табл. 4. Значения критерия Стьюдента коэффициентов уравнения регрессии второго порядка прочности образцов при изгибе

Table 4. Values of the Student's t-test coefficients of the second-order regression equation for the strength of specimens in bending

Параметры Parameters	Итерация j / Iteration j					
	0	1	2	3	4	5
B_j	$b_0 = 7,65$	$b_1 = 0,399$	$b_2 = 0,400$	$b_{12} = -0,477$	$b_{11} = -0,524$	$b_{22} = -0,838$
$ b_j $	7,65	0,399	0,400	0,477	0,524	0,838
t_{b_j}	631,1	32,9	33,0	39,3	43,2	69,2
p -значение / p -value	<0,0001					
Статус / Status	Значим Significant	Значим Significant	Значим Significant	Значим Significant	Значим Significant	Значим Significant

Проверка гипотезы об адекватности модели по критерию Фишера:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{воспр}}^2}, \tag{4}$$

где $S_{\text{ад}}^2 = \frac{m \sum (y_i^{\text{cp}} - \bar{y})^2}{N - M}$ — дисперсии адекватности;

$\bar{y}$ — рассчитанное по уравнению регрессии значение отклика; M — число оцениваемых коэффициентов регрессии, $m = 6$; n — количество параллельных измерений, $m = 3$, показало, что:

$$F_{\text{расч}} = 1,50 < F_{\text{табл}} = 3,2,$$

т.е. полученное значение критерия Фишера ($F_{\text{расч}}$) меньше табличного ($F_{\text{табл}}$) [23] на выбранном уровне значимости $\alpha = 0,05$, гипотеза об адекватности модели подтверждается.

Результаты испытаний прочности на сжатие были статистически обработаны с целью построения матрицы планирования эксперимента для расчета коэффициентов регрессии. С помощью компьютерной программы «Градиент» были получены матрицы РЦКП для двух факторов, представленные в табл. 5, 6.

Все коэффициенты значимы при $\alpha = 0,05$, так как все p -значения $< 0,05$. $R^2 = 0,9424$, т.е. модель объясняет 94,24 % изменчивости данных. Скорректированный $R^2 = 0,935$ — высокая объясняющая способность.

Ошибка дисперсии составляет $G_{\text{расч}} = 0,139 < G_{\text{табл}} = 0,477$, что указывает на однородность дисперсии.

Критерий значимости $t_{b_j} > t_{\text{табл}} = 2,014$, поэтому все коэффициенты статистически значимы на уровне значимости $\alpha = 0,05$ и даже на более строгих уровнях. P -значения $< 0,0001$ подтверждают высокую статистическую значимость всех коэффициентов регрессии.

Проверка гипотезы об адекватности модели по критерию Фишера показала, что:

$$F_{\text{расч}} = 2,399 < F_{\text{табл}} = 2,875,$$

т.е. гипотеза подтверждается.

Таким образом, по результатам проведенных исследований получены следующие уравнения регрессии для исследуемых критериев (прочность при изгибе и сжатии), графическая интерпретация которых изображена на рисунке:

$$R_{\text{изг}} = 7,65 + 0,40X_1 + 0,40X_2 - 0,48X_1X_2 - 0,52X_1^2 - 0,84X_2^2; \tag{5}$$

Табл. 5. Прочность на сжатие образцов, испытанных в возрасте 28 сут

Table 5. Compressive strength of specimens tested at the age of 28 days

Номер состава (опыта) Composition No. (experiment)	В натуральном виде, % In natural form, %			y_i^{cp} / y_i^{av}	$\hat{y}$	$(y_i^{cp} - \hat{y})^2 \cdot 10^3$ $(y_i^{av} - \hat{y})^2 \cdot 10^3$	Ошибка дисперсии S_i^2 Dispersion error S_i^2
	МК MK	ЗУ FA	ЗФК DKA				
1	3,2	4,8	1,9	56,9	56,1	0,575	0,500
2	1,2	8,0	0,7	68,2	68,0	0,101	0,162
3	1,7	2,5	5,8	66,4	66,0	0,177	1,478
4	0,9	6,0	3,1	63,8	63,7	0,001	1,609
5	2,9	1,3	5,8	62,1	62,8	0,462	0,890
6	0,9	7,2	1,9	69,5	69,6	0,003	1,656
7	2,0	8,0	0,04	58,0	58,7	0,370	2,942
8	1,1	4,5	4,4	62,6	62,7	0,017	2,029
9	1,4	5,7	2,9	74,1	74,1	0,000	1,563
Σ						1,710	12,83

Табл. 6. Значения критерия Стьюдента коэффициентов уравнения регрессии второго порядка прочности на сжатие

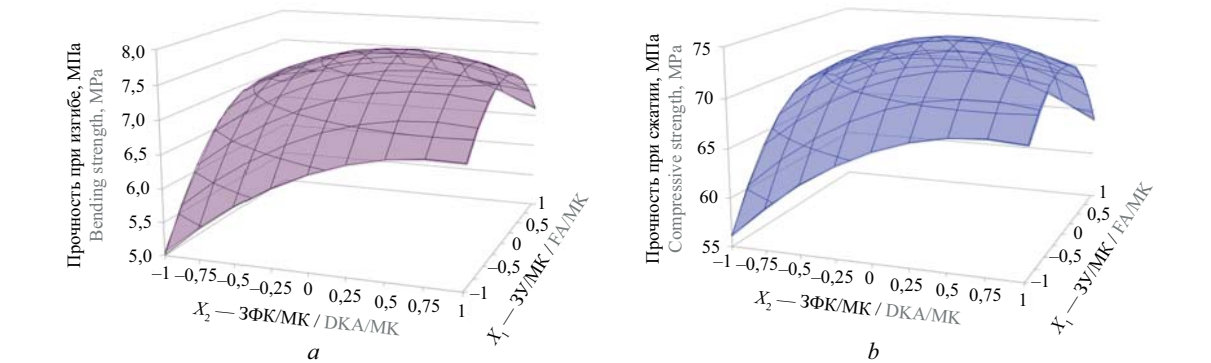
Table 6. Values of the Student's *t*-test coefficients of the second-order regression equation for compressive strength

Параметры Parameters	Итерация <i>j</i> / Iteration <i>j</i>					
	0	1	2	3	4	5
B_j	$b_0 = 74,1$	$b_1 = 2,40$	$b_2 = 1,44$	$b_{12} = -3,50$	$b_{11} = -3,94$	$b_{22} = -6,69$
$ b_j $	74,1	2,40	1,44	3,50	3,94	6,69
t_{b_j}	455,8	14,8	8,88	21,6	24,3	41,2
<i>p</i> -значение <i>p</i> -value	<0,0001					
Статус / Status	Значим Significant	Значим Significant	Значим Significant	Значим Significant	Значим Significant	Значим Significant

$$R_{сж} = 74,1 + 2,40X_1 + 1,44X_2 - 3,50X_1X_2 - 3,94X_1^2 - 6,69X_2^2. \quad (6)$$

Анализ полученных зависимостей показывает, что прочность при изгибе и сжатии имеет схожий характер зависимости от соотношения ЗУ/МК и ЗФК/МК, т.е. изменение этих свойств имеет экстремальный вид. Из уравнения (5) и (6) видно, что коэффициенты B_1 и B_2 имеют положительный знак, а B_{12} , B_{11} и B_{22} — отрицательный, что указывает на наличие экстремума и области оптимальных значений X_1 и X_2 .

Из математической модели, описывающей $R_{изг} = f(X_1, X_2)$, следует, что влияние содержания золы-уноса и золы финиковых косточек от содержания метакеолина в составе многокомпонентного вяжущего идентичное ($B_1 = B_2 = 0,40$). При этом избыток каждой из этих добавок приводит к негативному влиянию, направленному на снижение прочности при изгибе. При интенсивности этого влияния золы-уноса почти в 2 раза больше, чем золы финиковых косточек. На необходимость ограничения величины варьируемых факторов указывает также отрицатель-



Графическая интерпретация уравнений $R_{изг} = f(X_1, X_2)$ (a) и $R_{сж} = f(X_1, X_2)$ (b)
Graphical interpretation of equations $R_{bend} = f(X_1, X_2)$ (a) and $R_{comp} = f(X_1, X_2)$ (b)

Табл. 7. Результаты установления экстремумов и величины варьируемых факторов
Table 7. Results of establishing extremes and the magnitude of variable factors

$R_{изг}^*, \text{МПа}$ $R_{bend}^*, \text{МПа}$	$R_{сж}^*, \text{МПа}$ $R_{comp}^*, \text{МПа}$	В кодовом виде / In code form		МК МК	ЗУ FA	ЗФК DKA
		X_1	X_2			
7,58	—	0,178	0,622	5,5	1	3,5
—	72,4	0,116	0,611	6	1	3

ный коэффициент $B_{12} = -0,52$, демонстрирующий совместный негативный эффект на $R_{изг}^*$.

Анализ уравнения (6) показывает, что на прочность при изгибе влияние варьируемых факторов имеет различную интенсивность. При этом оба фактора влияют положительно. ЗУ/МК имеет более интенсивное положительное влияние на $R_{сж}^*$, чем ЗФК/МК. Однако совместное воздействие или избыток содержания золы-уноса и золы финиковых косточек, так как и для прочности при изгибе, характеризуется негативным влиянием на прочность при сжатии. Причем этот эффект почти в 1,5–3,0 раза больше, чем положительный. Это указывает на необходимость установления оптимального количества каждого из этих компонентов.

Поиск максимумов для уравнений осуществляется через производную, взятую по X_1 и X_2 . Результаты установления экстремумов и величина варьируемых факторов представлены в табл. 7.

Таким образом, путем математической оптимизации полученных результатов экспериментальных испытаний установлено, что наибольшей прочностью на сжатие 72,4 МПа и на растяжение при изгибе 7,58 МПа в возрасте 28 сут обладает четырехкомпонентное вяжущее на основе портландцемента с частичной его заменой в количестве 10 мас. % смесью активных тонкодисперсных добавок, состоящей из метакаолина, золы-уноса и золы финиковых косточек.

чек при их оптимальном соотношении в указанной смеси МК:ЗУ:ЗФК = (55–60):10:(30–35).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе проведенных исследований по оптимизации четырехкомпонентного вяжущего с использованием местного сырья Республики Ирак получены регрессионные модели второго порядка:

$$R_{изг}^* = f\left(\frac{ЗУ}{МК}, \frac{ЗФК}{МК}\right) \text{ и } R_{сж}^* = f\left(\frac{ЗУ}{МК}, \frac{ЗФК}{МК}\right),$$
 адекватно описывающие зависимости прочности четырехкомпонентного вяжущего при изгибе и на сжатие от соотношений активных тонкодисперсных добавок, состоящих из метакаолина, золы-уноса и золы финиковых косточек.

Установлено, что наибольшей прочностью на сжатие 72,4 МПа и на растяжение при изгибе 7,58 МПа обладает вяжущее на основе портландцемента с частичной его заменой (в количестве 10 % мас.) смесью активных тонкодисперсных добавок при оптимальном соотношении МК:ЗУ:ЗФК = (55–60):10:(30–35). Таким образом, для получения эффективного вяжущего на территории Ирака могут быть использованы местные ресурсы в виде зол аграрной и строительной промышленности. Состав разработанного четырехкомпонентного вяжущего включает портландцемент — 90 %, метакаолин — 6 %, золу-уноса — 1 % и золу финиковых косточек — 3 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Британский патент № 5022. Усовершенствование способа производства искусственного камня / Аспдин Дж. 1824.
2. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. М. : Высшая школа, 1973. 504 с.
3. Andrew R.M. Global CO₂ emissions from cement production // Earth System Science Data. 2018. Vol. 10. Issue 1. Pp. 195–217. DOI: 10.5194/essd-10-195-2018
4. Танг Ван Лам, Нгуен Зоан Тунг Лам, Самченко С.В. Влияние добавки золошлакового отхода на свойства сульфоалюминатного портландцемента // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 8. С. 991–1003. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.991-1003. EDN RLRYSI.
5. Иноземцев А.С., Королёв Е.В., Доунг Т.К. Структурная модель течения пластифицированных цементно-минеральных смесей // Строительные ма-

териалы. 2020. № 4–5. С. 90–96. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-90-96. EDN CVBCCN.
6. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 114. Pp. 2–26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
7. Provis J.L. Alkali-activated materials // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 114. Pp. 40–48. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.02.009
8. Gartner E. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements // Cement and Concrete Research. 2004. Vol. 34. Issue 9. Pp. 1489–1498. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.01.021
9. Scrivener K., Martirena F., Bishnoi S., Maity S. Calcined clay limestone cements (LC³) // Cement

and Concrete Research. 2008. Vol. 114. Pp. 49–56. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.08.017

10. *Avet F., Scrivener K.* Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 107. Pp. 124–135. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.02.016

11. *Al-Hamamre Z., Saidan M., Hararah M., Rawajfeh K., Alkhasawneh H.E., Al-Shannag M.* Wastes and biomass materials as sustainable-renewable energy resources for Jordan // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 67. Pp. 295–314. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.035

12. *Gunarani G.I., Chakkravarthy S.P.* Experimental studies on effect of Date Seed Ash (DSA) on strength properties of cement sand mortar // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 80. P. 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/80/1/012015

13. *Танг Ван Лам, Булгаков Б.И., Александрова О.В.* Возможность использования золы-уноса и золы рисовой шелухи для получения геополимерных бетонов // *Инновации и моделирование в строительном материаловедении и землеустройстве : мат. V Междунар. науч.-техн. конф.* 2021. С. 126–131. EDN BYKMMG.

14. *Танг Ван Лам, Ву Ким Дьен, Булгаков Б.И.* Исследование сочетания летучей золы и доменного шлака для получения высокопрочного мелкозернистого бетона без цемента // *Журнал строительства*. 2021. № 10. С. 183–190.

15. *Mehta P.K., Monteiro P.J.* Concrete — Structure, Properties and Materials. University of California at Berkeley, 2006. 684 p.

16. *Абомелик Т.П.* Методология планирования эксперимента : учебное пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2006. 37 с.

17. *Образцов И.В.* Оптимизация зерновых составов цементно-минеральных смесей для производства строительных композитов методами компьютерного моделирования : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2014. 23 с. EDN ZPLQCP.

18. *Шмигальский В.Н.* Оптимизация состава цементобетонов. Кишинев : Штиинца, 1981. 123 с.

19. *Танг В.Л., Булгаков Б.И., Александрова О.В.* Математическое моделирование влияния сырьевых компонентов на прочность высококачественного мелкозернистого бетона при сжатии // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 9 (108). С. 999–1009. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.9.999-1009. EDN ZHKODP.

20. *Tuyen Minh Nguyen.* Planning of the experiment // *Publishing of Science and Technology*. Hanoi, 2007. 264 p.

21. *Фарах А.А., Булгаков Б.И.* Влияние замены части портландцемента на метакаолин на свойства мелкозернистого бетона // *Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2023 : сб. докл. IV Национ. науч. конф.* 2024. С. 284–287. EDN GNKMDM.

22. *Гмурман В.Е.* Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. М. : Высшая школа, 1977. 334 с.

23. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М. : Наука, 1983. 416 с.

Поступила в редакцию 19 января 2026 г.

Принята в доработанном виде 22 января 2026 г.

Одобрена для публикации 20 мая 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Фарах Алаа Абдуламир Альваш** — аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 59132544700, ORCID: 0009-0008-7214-9919; alwashfarah@gmail.com;

Александр Сергеевич Иноземцев — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 616006, Scopus: 55889834500, ORCID: 0000-0001-7807-688X; InozemcevAS@mgsu.ru;

Борис Игоревич Булгаков — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 281781, Scopus: 57192383523, ORCID: 0009-0002-4737-8524; bulgakovbi@mgsu.ru;

Юлия Сергеевна Филимонова — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного, гражданского и подземного строительства; **Московский политехнический университет (МПУ)**; 107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38; РИНЦ ID: 1021538, Scopus: 58823301800, ORCID: 0009-0002-3793-8433; julias06@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. British Patent No. 5022. *Improvement in the method of producing artificial stone* / Aspdin J.P. 1824.
2. Butt Yu.M., Timashev V.V. *Workshop on chemical technology of binders*. Moscow, Vysshaya Shkola, 1973; 504. (rus.).
3. Andrew R.M. Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*. 2018; 10(1):195-217. DOI: 10.5194/essd-10-195-2018
4. Tang Van Lam, Nguyen Doan Tung Lam, Samchenko S.V. Effect of ash-and-slag waste on the properties of sulphoaluminate Portland cement. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2019; 14(8):991-1003. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.991-1003. EDN RLRYCI. (rus.).
5. Inozemtsev A.S., Korolev E.V., Doung T.Q. Structural flow model of plasticized cement-mineral mixtures. *Construction Materials*. 2020; 4-5:90-96. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-90-96. EDN CVBCCH. (rus.).
6. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*. 2018; 114:2-26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
7. Provis J.L. Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*. 2018; 114:40-48. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.02.009
8. Gartner E. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete Research*. 2004; 34(9):1489-1498. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.01.021
9. Scrivener K., Martirena F., Bishnoi S., Maity S. Calcined clay limestone cements (LC³). *Cement and Concrete Research*. 2008; 114:49-56. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.08.017
10. Avet F., Scrivener K. Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*. 2018; 107:124-135. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.02.016
11. Al-Hamamre Z., Saidan M., Hararah M., Rawajfeh K., Alkhasawneh H.E., Al-Shannag M. Wastes and biomass materials as sustainable-renewable energy resources for Jordan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 67:295-314. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.035
12. Gunarani G.I., Chakkravarthy S.P. Experimental studies on effect of Date Seed Ash (DSA) on strength properties of cement sand mortar. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 80:012015. DOI: 10.1088/1755-1315/80/1/012015
13. Tang V.L., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V. Possibility of using rice ash and rice hull ash for geopolymer concrete. *Innovations and Modeling in Construction Materials Science and Land Management : Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference*. 2021; 126-131. EDN BYKMMG. (rus.).
14. Tang Van Lam, Vu Kim Dien, Bulgakov B.I. Research on combination of fly ash and blast furnace slag to make high-performance fine-grained concrete without cement. *Journal of Construction*. 2021; 10:183-190. (rus.).
15. Mehta P.K., Monteiro P.J. *Concrete — Structure, Properties and Materials*. University of California at Berkeley, 2006; 684.
16. Abomelik T.P. *Methodology of Experimental Design : textbook*. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University, 2006; 37. (rus.).
17. Obraztsov I.V. *Optimization of the particle size distribution of cement-mineral mixtures for the production of construction composites using computer modeling methods : abstract of Candidate of Technical Sciences dissertation*. Voronezh, 2014; 23. EDN ZPLQCP. (rus.).
18. Shmigalsky V.N. *Optimization of Cement-Concrete Composition*. Chisinau, Shtiintsa, 1981; 123.
19. Tang V.L., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V. Mathematical modeling of the impact of raw material composition on compressive strength of high performance fine-grained concrete. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12(9):(108):999-1009. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.9.999-1009. EDN ZHKODP. (rus.).
20. Tuyen Minh Nguyen. Planning of the experiment. *Publishing of Science and Technology*. Hanoi, 2007; 264.
21. Farah A.A., Bulgakov B.I. The effect of replacing part of Portland cement with metakaolin on the properties of fine-grained concrete. *Current Issues in the Construction Industry and Education – 2023 : proceedings of the IV National Scientific Conference*. 2024; 284-287. EDN GNKMDM. (rus.).
22. Gmurman V.E. *Guide to Solving Problems in Probability Theory and Mathematical Statistics*. Moscow, Vysshaya Shkola, 1977; 334. (rus.).
23. Bolshev L.N., Smirnov N.V. *Tables of mathematical statistics*. Moscow, Nauka, 1983; 416. (rus.).

Received January 19, 2026.

Adopted in revised form on January 22, 2026.

Approved for publication on May 20, 2026.

B I O N O T E S: **Farah Alaa Abdulameer Alwash** — postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 59132544700, ORCID: 0009-0008-7214-9919; alwashfarah@gmail.com;

Aleksandr S. Inozemtcev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Construction Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 616006, Scopus: 55889834500, ORCID: 0000-0001-7807-688X; InozemtcevAS@mgsu.ru;

Boris I. Bulgakov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 281781, Scopus: 57192383523, ORCID: 0009-0002-4737-8524; bulgakovbi@mgsu.ru;

Yuliya S. Filimonova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial, Civil and Underground Construction; **Moscow Polytechnic University**; 38 Bolshaya Semenovskaya st., Moscow, 107023, Russian Federation; ID RSCI: 1021538, Scopus: 58823301800, ORCID: 0009-0002-3793-8433; julias06@mail.ru.

Authors' contributions: all authors contributed equally to the publication.

The authors declare no conflicts of interest.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 628.29:629.3.016

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1168-1180

Совершенствование конструкций сооружений локальной очистки поверхностных сточных вод

Дарья Дмитриевна Худякова¹, Олег Григорьевич Примин²,
Григорий Николаевич Громов²

¹ АО «Мосводоканал»; г. Москва, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В большинстве городов и поселений России отмечается износ, а зачастую и отсутствие централизованной системы отвода и очистки поверхностных сточных вод (ПСВ). Это определяет актуальность рассмотренной проблемы повышения технологической надежности конструкций локальных очистных сооружений ПСВ.

Материалы и методы. Проведены анализ проектных и паспортных данных и практики эксплуатации ряда локальных очистных сооружений ПСВ в г. Москве, исследование и моделирование процесса очистки ПСВ фильтрационно-сорбционным методом на лабораторной и опытно-промышленной установке (ОПУ) при загрузке различными фильтрующими материалами в различных режимах и динамических условиях на реальных ПСВ, формирующихся на селитебных территориях, автомагистралях и промзонах г. Москвы.

Результаты. Натурные и экспериментальные исследования показали, что технологические решения и конструкции подобных установок имеют ряд существенных недостатков. Заявляемая степень очистки ПСВ по остаточному содержанию только трех показателей загрязнения является недостаточной для получения разрешения природоохранных органов на сброс очищенных сточных вод в водные объекты. Разработана усовершенствованная технологическая схема очистки ПСВ, в которой применена новая установка предварительной механической очистки ПСВ проточного типа из стеклокомпозитных материалов, на которую получен патент на полезную модель RU № 207418U1 «Устройство для очистки поверхностных сточных вод».

Выводы. Принимаемые в настоящее время к проектированию локальные проточные системы очистки ПСВ не соответствуют нормам проектирования, действующим в РФ, и не обеспечивают нормативные требования к степени очистки ПСВ, установленные природоохранным и водным законодательствами. Выполненные исследования на ОПУ подтвердили работоспособность лабораторной установки и выбор загрузок и реагентов, и продемонстрировали, что концентрация ПСВ после доочистки на фильтрах с различными фильтрующими загрузками соответствует предельно допустимым концентрациям загрязнений водного объекта рыбохозяйственного значения, а также СанПин 1.2.3685–21.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сточные воды, сооружения, анализ, эксплуатация, конструкции, методы, установки, исследования, эксперимент, совершенствование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Худякова Д.Д., Примин О.Г., Громов Г.Н. Совершенствование конструкций сооружений локальной очистки поверхностных сточных вод // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 7. С. 1168–1180. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1168-1180

Автор, ответственный за переписку: Олег Григорьевич Примин, tepper2007@yandex.ru.

Improvement of structural designs of local surface wastewater treatment facilities

Darya D. Khudyakova¹, Oleg G. Primin², Grigoriy N. Gromov²

¹ JSC “Mosvodokanal”; Moscow, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. In most Russian cities and settlements, there is a lack of centralized surface wastewater (SWW) treatment systems, which makes it necessary to improve the technological reliability of local SWW treatment facilities.

Materials and methods. The analysis of design and passport data and the practice of operation of a number of local wastewater treatment facilities in the city of Moscow, the study and modeling of the process of wastewater treatment by the fil-

tration-sorption method on a laboratory installation and a pilot plant (PP) with loading of various filter materials in different modes and dynamic conditions on real wastewater formed in residential areas, highways, and industrial zones in Moscow.

Results. Full-scale and experimental studies have shown that the technological solutions and designs of such installations have a number of significant drawbacks. The declared degree of purification of the SWW by the residual content of only three pollution indicators is insufficient to obtain permission from environmental authorities to discharge treated wastewater into water bodies. An improved technological scheme for the purification of the SWW has been developed, which uses a new flow-type pre-treatment unit for the SWW made of glass composite materials, for which a utility model patent RU 207418U1 "Device for Purification of Surface Wastewater" has been obtained.

Conclusions. The local flow-through SWW purification systems currently being designed do not comply with the design standards in force in the Russian Federation and do not meet the regulatory requirements for the degree of SWW purification established by environmental and water legislation. The studies conducted at the PP confirmed the functionality of the laboratory setup and the selection of media and reagents, and showed that the concentration of SWW after post-treatment on filters with various media corresponds to the maximum permissible concentrations of pollutants in a water body of fishery importance, as well as to Sanitary rules and regulations 1.2.3685–21.

KEYWORDS: wastewater, facilities, analysis, operation, designs, methods, installations, research, experiment, improvement

FOR CITATION: Khudyakova D.D., Primin O.G., Gromov G.N. Improvement of structural designs of local surface wastewater treatment facilities. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(7):1168-1180. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1168-1180 (rus.).

Corresponding author: Oleg G. Primin, tepper2007@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность изучения методов повышения технологической надежности и совершенствования конструкций локальных установок очистки поверхностных сточных вод (ПСВ) небольшой производительности отмечена в работах [1–6] и определена:

- требованиями охраны водных объектов и состояния селитебных территорий [7–11];
- изменением нормативов допустимых сбросов (НДС), рассчитанных на основе предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ в воде водных объектов рыбохозяйственного значения [12–15];
- интеграцией нормирования сбросов очистных сооружений ПСВ по уровням их воздействия на окружающую среду [16–18];
- изменением климата и соответственно интенсивности осадков [19–21].

Это требует проведения экспериментальных исследований в части обоснования применения в системах очистки ПСВ различных конструкций очистных сооружений (установок) при сбросе ливневых вод в системы водоотведения и в водные объекты, обеспечивающих нормативные требования к качеству очистки ПСВ на уровне:

- максимально допустимых показателей концентраций ПСВ для предотвращения негативного воздействия на функционирование систем водоотведения городов и поселений России;
- технологических нормативов наилучших доступных технологий очистки ПСВ;
- норм допустимых санитарных показателей сбросов загрязняющих веществ в водные объекты, соответствующих предельно допустимым концентрациям ПСВ для нормативов водоемов рыбохозяйственного значения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В практике проектирования и эксплуатации локальных систем очистки ПСВ в большинстве городов России используются очистные сооружения проточного типа без аккумулирующего резервуара в условиях крайне неравномерной гидравлической нагрузки. Это приводит к сбросу диффузионного стока и неочищенных ливневых вод в водные объекты, приносит ощутимый вред окружающей среде и требует их реконструкции и развития.

Проведенный анализ проектирования и эксплуатации очистных установок проточного типа (на примере локальных сооружений по очистке ПСВ на территории г. Москвы) показал, что конструкции подобных установок имеют значительные недостатки:

1. Заявляемая степень очистки ПСВ по остаточному содержанию на уровне ПДК нормативов водоемов рыбохозяйственного значения только трех показателей загрязнения (нефтепродуктов, взвешенных веществ и БПК₅) является недостаточной для получения разрешения природоохранных органов на сброс очищенных ПСВ в водные объекты.

2. Применяемый метод разделения поверхностного стока в очистных сооружениях проточного типа (по расходу) вызывает существенное повышение негативного воздействия сбросов ПСВ на водные объекты. В отличие от метода разделения стока по объему и применяемого в очистных системах накопительного типа (с аккумулирующими резервуарами) это приводит к сбросу в водные объекты сильно загрязненных поверхностных сточных вод и свидетельствует о низкой барьерной функции сооружений.

3. Реальный эффект задержания взвешенных веществ в секциях отстаивания обследованных локальных систем очистки ПСВ в связи с временем пребывания загрязненных ПСВ от 1,5 до 20 мин, и так как в дождевом стоке содержатся в основном

мелкодисперсные взвешенные вещества, составляет не более 15–20 %.

4. Материалы, применяемые в качестве фильтрующих загрузок в сооружениях проточного типа, не могут обеспечить заявленную степень очистки.

5. Производительность очистных сооружений проточного типа быстро снижается вследствие кольматации фильтрующей загрузки из-за отсутствия системы промывки фильтров. Данная проблема также приводит к превышению нормативных требований на сброс в водные объекты культурно-бытового водопользования в 2,5–60 раз, а при сбросе в водные объекты рыбохозяйственного значения — в 14–350 раз.

Проведены экспериментальные исследования на лабораторной и опытно-промышленных установках (ОПУ) очистки ПСВ. Лабораторная установка была смонтирована в здании действующих очистных сооружений «Кожухово» ГУП «Мосводосток» в составе шести фильтровальных колонок и является универсальной в экспериментальных исследованиях по разработке технологии очистки ПСВ и конструкций очистных сооружений с использованием стеклокомпозитных материалов, а также позволяет моделировать работу как безнапорных, так и напорных фильтров.

Принципиальная технологическая схема лабораторной фильтрационно-сорбционной установки для проведения экспериментальных исследований по глубокой очистке ПСВ и спецификация оборудования приведены на рис. 1.

Проектная производительность экспериментальной лабораторной установки составляет 160–380 л/ч или 0,04–0,1 л/с, высота фильтровальных колонок, изготовленных из акрилового стекла диаметром 200 мм, — 1800 мм.

В ее состав входят:

- сборная емкость поверхностного стока объемом 220 л (1 шт.);
- насос для подачи сточных вод на очистку в фильтровальные колонны (1 шт.);
- фильтровальные колонны диаметром 200 мм, высотой 1800 мм, изготовленные из акрилового стекла (6 шт.);
- сборная емкость для приема промывных вод объемом 200 л (1 шт.);
- реагентное хозяйство, в том числе расходные емкости с насосами-дозаторами (2 шт.).

Фильтровальная колонна (8в на рис. 1), загруженная кварцевым песком и гравием (поддерживающий слой), моделирует работу механического фильтра, задачей которого в разрабатываемой технологии очистки является снижение содержания взвешенных веществ в сточных водах перед сорбционными и ионообменными фильтрами до 2–5 мг/л.

Фильтровальные колонны (8г и 8е на рис. 1), загруженные соответственно мезопористым ископаемым углем МИУ-сорб и активированным углем АГ-3, моделируют работу сорбционных фильтров,

задача которых заключается в снижении содержания растворенных нефтепродуктов в стоках до нормативных требований СанПиН 2.1.5.980–00 и ПДК загрязняющих веществ в воде водных объектов рыбохозяйственного значения.

Фильтровальная колонна (8д на рис. 1), загруженная природным цеолитом, моделирует работу ионообменного фильтра, в задачу которого входит снижение в ПСВ металлов — железа, цинка, никеля, меди, свинца и марганца.

При наличии в поверхностном стоке кинетически устойчивой мелкодисперсной взвеси применяется реагентная обработка стоков (коагулянтами и флокулянтами). Для этого в лабораторной установке предусмотрено реагентное хозяйство (9 на рис. 1), включающее расходные емкости и насосы-дозаторы (9а на рис. 1).

Поверхностные сточные воды после отстаивания из сборной емкости (2 на рис. 1) насосом (1 на рис. 1) подаются в одну из фильтровальных колонок (8 на рис. 1). Фильтрация осуществляется сверху вниз при скорости потока для всех видов загрузок в пределах 5–10 м/ч. Очищенные сточные воды через нижний штуцер колонны отводятся в сеть хозяйственно-бытовой канализации. При моделировании безнапорного режима работы фильтра над загрузкой в колонне поддерживается постоянный уровень воды — 0,2 м. При повышении указанного уровня фильтры останавливаются на водовоздушную промывку. Подача воздуха в колонну производится от компрессора (на схеме не показан), промывной воды — из системы хозяйственно-питьевого водоснабжения снизу вверх. Сброс промывной воды предусмотрен в систему хозяйственно-бытовой канализации или в аккумулирующий резервуар. Интенсивность промывки загрузки составляет 14–18 л/с·м², продолжительность — 5–6 мин.

На лабораторной установке выполнены экспериментальные исследования моделирования процессов механического фильтрования реальных ПСВ (с использованием реагентов или без них), сорбции и ионного обмена в динамических условиях на реальных поверхностных сточных водах, формирующихся на сельтерских территориях, автомагистралях и промзонах. С целью подтверждения эффективности фильтрационно-сорбционной технологии очистки ПСВ, разработанной в лабораторных условиях, а также для подтверждения работоспособности нового очистного оборудования — фильтров и смесителей, изготовленных из стеклопластиковых труб, была разработана и смонтирована ОПУ. Установка предназначена для проведения опытно-промышленных испытаний по очистке ПСВ в натурных условиях на реальных сточных водах.

Габаритные размеры установки: 4560 × 1370 × 2468 мм (длина, ширина, высота).

Номинальная производительность установки — 1–2 м³/ч.

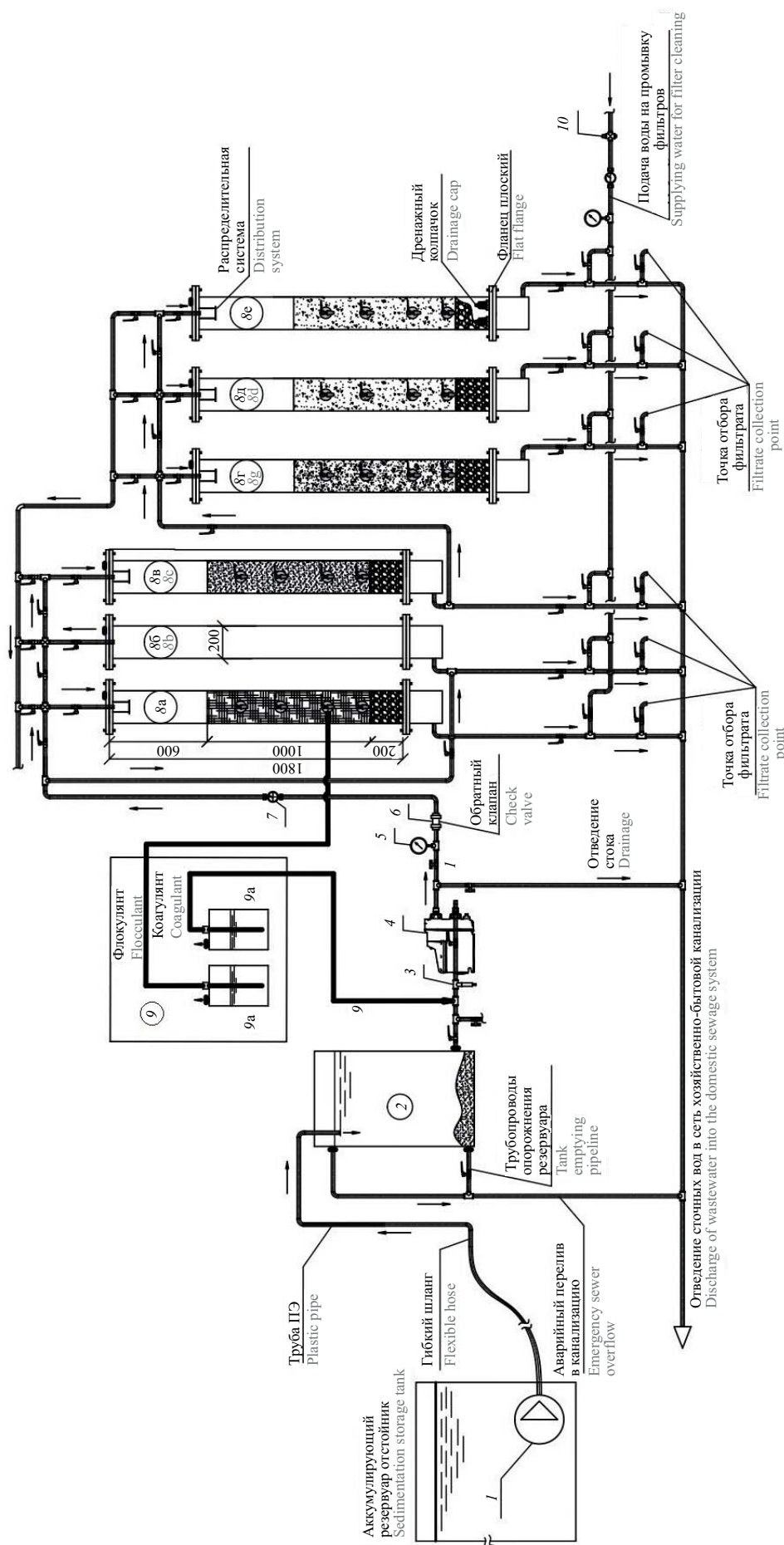


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема работы лабораторной установки при проведении исследований по очистке ПСВ: 1 — насос погружной; 2 — насос погружной бак; 3 — магистральный фильтр; 4 — насос подачи сточных вод на фильтрацию; 5 — манометр; 6 — обратный клапан; 7 — счетчик для воды; 8 — фильтровальные колонны; 8а — фильтр с сорбентом; 8б — камера хлорьеобразования; 8в — фильтр с кварцевым песком; 8г — фильтр с цеолитом; 8е — фильтр с активированным углем; 9 — реагентное хозяйство; 9а — насос-дозатор; 10 — регулятор давления

Fig. 1. Basic flow diagram of the laboratory installation for conducting studies on SWW purification: 1 — submersible pump; 2 — plastic tank; 3 — main filter; 4 — pump for feeding wastewater to filtration; 5 — pressure gauge; 6 — check valve; 7 — water meter; 8 — filter columns; 8a — filter with peat; 8b — flocculation chamber; 8c — filter with quartz sand; 8g — filter with MIU-sorb; 8d — filter with zeolite; 8e — filter with activated carbon; 9 — reagent system; 9a — dosing pump; 10 — pressure regulator

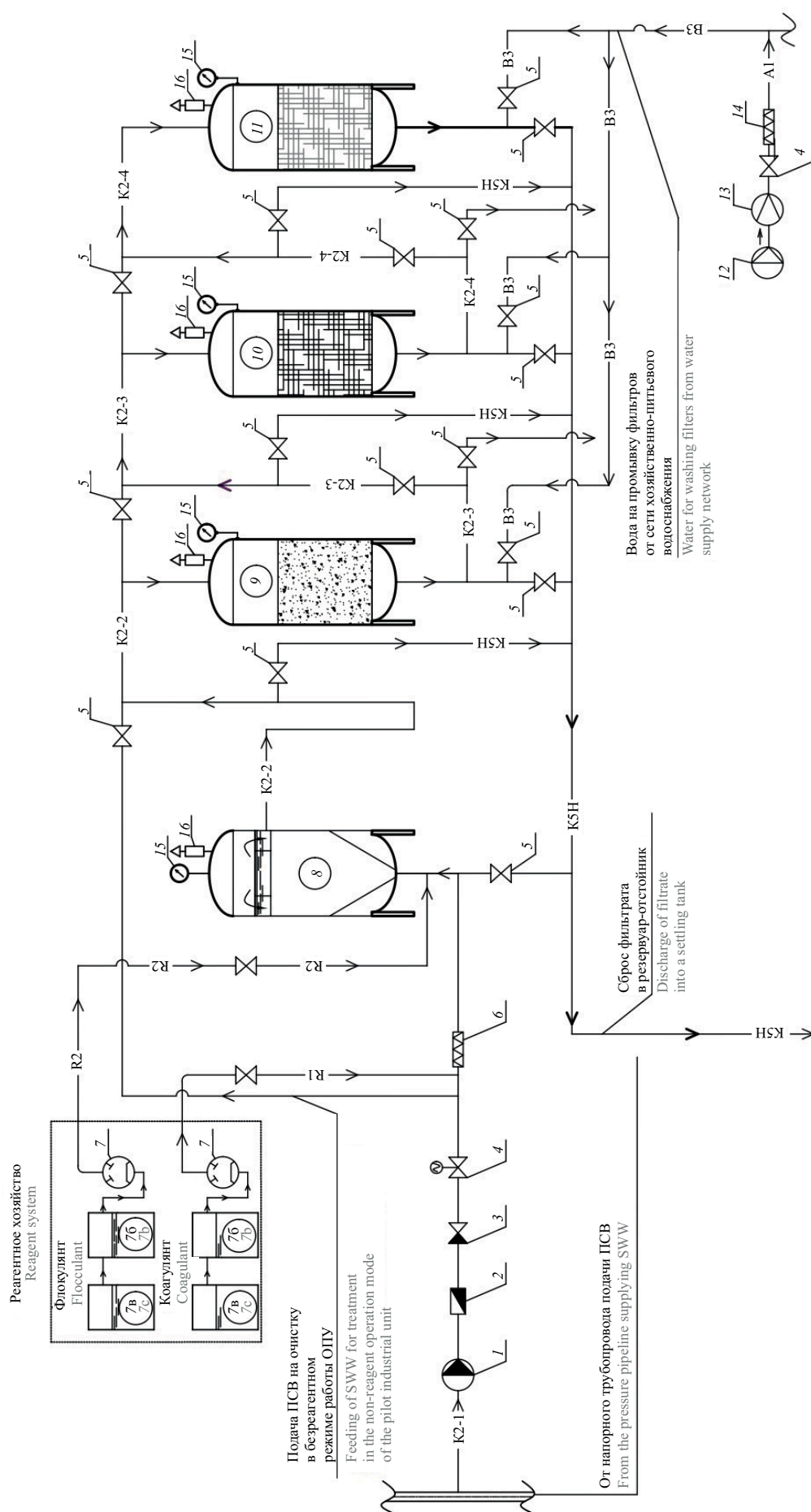




Рис. 3. Внешний вид ОПУ очистки поверхностных сточных вод, размещенной в здании действующих очистных сооружений ливневой канализации «Кожуховский пруд» (ГУП «Мосводосток»)

Fig. 3. General view of the Pilot Plant (PP) for surface wastewater (SWW) treatment installed at the operating “Kozhukhovskiy Pond” stormwater treatment facility (“Mosvodostok” State Unitary Enterprise, Moscow)

В состав ОПУ входит технологическое оборудование, выполненное из напорных стеклопластиковых труб марки FLOWTECH™ номинальным диаметром DN500, давлением PN 6 и жесткостью SN 5000, в том числе:

- 1) скорые напорные фильтры — механические (9 рис. 1), ионообменные (10 на рис. 1) и сорбционные;
- 2) камера хлопьеобразования (КХО) со встроенным вихревым смесителем, предназначенным для эффективного смешения применяемых при очистке сточных вод реагентов (коагулянтов и флокулянтов), необходимость введения которых была подтверждена экспериментальными исследованиями на лабораторной установке при очистке ПСВ, содержащих кинетически устойчивые мелкодисперсные примеси.

Исследования на ОПУ позволили моделировать процессы:

- механической и/или физико-химической очистки ПСВ от взвешенных веществ и нефтепродуктов фильтрованием через инертные загрузки с предварительной обработкой стоков реагентами или без них;
- адсорбции органических загрязнений (нефтепродуктов и других растворенных органических ве-

ществ природного и техногенного происхождения) в динамических условиях путем фильтрования сточных вод через слой адсорбента;

- ионного обмена в динамических условиях путем фильтрования ПСВ через зернистые материалы, обладающие ионообменными свойствами по отношению к ионам тяжелых металлов и азоту аммонийному.

Технологическая схема и спецификация оборудования ОПУ приведены на рис. 2. Внешний вид опытно-промышленной установки очистки ПСВ, размещенной в здании действующих очистных сооружений дождевой канализации ТТК «Кожуховский пруд» (ГУП «Мосводосток»), показан на рис. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования на лабораторной установке показали, что наибольший эффект очистки ПСВ достигается при использовании таких загрузок, как гидроантрацит фр. 0,8–2,0 мм, кварцевый песок фр. 2–5,0 мм на гравии, сорбенты МИУ-С1 и МИУ-С2 и активированный уголь АГ-3 фр. 1,5–2,8. Реагенты: полиоксихлорид алюминия, Аква-аурат 10, АА 10, флокулянт праестол 852. Эффект очистки ПСВ на содержание

Табл. 1. Значения показателей загрязнения поверхностных сточных вод, подаваемых на лабораторную установку, до и после фильтрования стоков

Table 1. Values of surface wastewater pollution indicators supplied to the laboratory unit before and after wastewater filtration

Определяемый элемент Target element	Массовая концентрация / Mass concentration			
	Исходные ПСВ, отобранные в 9:00 Raw SWW specimens taken at 9:00 AM	Исходные ПСВ, отобранные в 18:00 Raw SWW specimens taken at 18:00 AM	ПСВ после песчаного фильтра SWW after sand filter	ПСВ после фильтра с гидроантрацитом SWW after hydroanthracite filter
рН, ед. рН pH, units	6,7	6,5	6,4	6,4
Аммоний, мг/дм³ Ammonium ion, mg/dm³	0,89	0,62	0,68	0,58
Взвешенные вещества, мг/дм³ / Suspended solids, mg/dm³	32	21	0,69	0,5
Фосфат-ион, мг/дм³ Phosphate ion, mg/dm³	0,36	0,29	0,12	0,089
БПК ₅ , мг/дм³ BOD ₅ , mg/dm³	6,12	6,1	3,7	3,2
Нефтепродукты, мг/дм³ Oil products, mg/dm³	1,29	0,9	0,44	0,3
АПАВ, мг/дм³ Anionic active surface substances, mg/dm³	0,45	0,46	<0,01	<0,01
Ni, мг/дм³ mg/dm³	0,017	0,014	0,015	<0,013
Sr, мг/дм³ mg/dm³	0,4	0,53	0,38	0,33
Cd, мг/дм³ mg/dm³	0,00079	0,00061	0,0005	0,00043
Cu, мг/дм³ mg/dm³	0,04	0,051	0,034	0,031
Pb, мг/дм³ mg/dm³	0,0024	0,0023	<0,002	<0,002
Zn, мг/дм³ mg/dm³	0,1	0,091	0,08	0,031
Mn, мг/дм³ mg/dm³	0,43	0,44	0,034	0,032
Fe общ., мг/дм³ Total Fe, mg/dm³	0,82	0,9	0,22	0,29
Cr общ., мг/дм³ Total Cr, mg/dm³	0,07	0,06	<0,02	<0,02

металлов (никель, медь, цинк, кадмий, свинец, железо и хром) по взвешенным веществам и нефтепродуктам составил 92,5 %, что отвечает нормативным требованиям на сброс очищенных ПСВ в водные объекты.

В табл. 1 приведены значения показателей загрязнения поверхностных сточных вод, подаваемых на лабораторную установку, моделирующую работу двухслойного фильтра, до и после фильтрования стоков. Загрузка двухслойного сорбционного фильтра: гидроантрацит фр. 0,8–2,0 мм, кварцевый песок

фр. 2–5,0 мм на гравии, сорбент МИУ-С1 и МИУ-С2 и активированный уголь АГ-3 фр. 1,5–2,8 мм.

Проведенные исследования на ОПУ подтвердили работоспособность лабораторной установки и выбор загрузок и реагентов, и показали, что концентрация ПСВ после очистки на фильтрах с различными фильтрующими загрузками соответствует ПДК водного объекта рыбохозяйственного значения, а также СанПин 1.2.3685–21. Значения показателей загрязнения ПСВ при работе двухслойных скорых фильтров при двухступенчатой схеме приведены в табл. 2

Табл. 2. Результаты анализа проб сточных вод на ОПУ

Table 2. Results of wastewater specimens analysis at the Pilot Plant

Определяемый элемент Target element	Массовая концентрация / Mass concentration			
	Исходные ПСВ, отобранные в 9:00 Raw SWW specimens taken at 9:00 AM	Исходные ПСВ, отобранные в 18:00 Raw SWW specimens taken at 18:00 AM	ПСВ после песчаного фильтра SWW after sand filter	ПСВ после фильтра с гидроантрацитом SWW after hydroanthracite filter
рН, ед. рН pH, units	7,4	7,5	7,3	7,3
Аммоний, мг/дм³ Ammonium ion, mg/dm³	0,89	0,62	0,68	0,49
Взвешенные вещества, мг/дм³ Suspended solids, mg/dm³	41	34	1,2	0,5
Фосфат-ион, мг/дм³ Phosphate ion, mg/dm³	0,32	0,22	0,2	0,09
БПК ₅ , мг/дм³ BOD ₅ , mg/dm³	6,23	6,13	3,76	3,12
Нефтепродукты, мг/дм³ Oil products, mg/dm³	1,09	0,9	0,3	0,22
АПАВ, мг/дм³ Anionic active surface substances, mg/dm³	0,5	0,46	<0,01	<0,01
Ni, мг/дм³ mg/dm³	0,015	0,014	0,015	<0,013
Sr, мг/дм³ mg/dm³	0,49	0,63	0,48	0,43
Cd, мг/дм³ mg/dm³	0,00072	0,00067	0,00057	0,00045
Cu, мг/дм³ mg/dm³	0,035	0,050	0,044	0,041
Pb, мг/дм³ mg/dm³	0,002	0,0024	<0,002	<0,002
Zn, мг/дм³ mg/dm³	0,17	0,20	0,014	0,12
Mn, мг/дм³ mg/dm³	0,43	0,44	0,34	0,29
Fe общ., мг/дм³ Total Fe, mg/dm³	0,589	0,201	0,18	0,12
Cr общ., мг/дм³ Total Cr, mg/dm³	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02

По результатам лабораторных и экспериментальных исследований разработана усовершенствованная технологическая схема очистки ПСВ с территории поселений, обеспечивающая нормативные требования к качеству очистки стоков при сбросе в централизо-

ванные системы водоотведения и/или в водные объекты, включающая два блока (рис. 4):

- подземный — установка предварительной механической очистки ПСВ с системами сбора и удаления нефтепродуктов, гидросмыва осадка и удаления

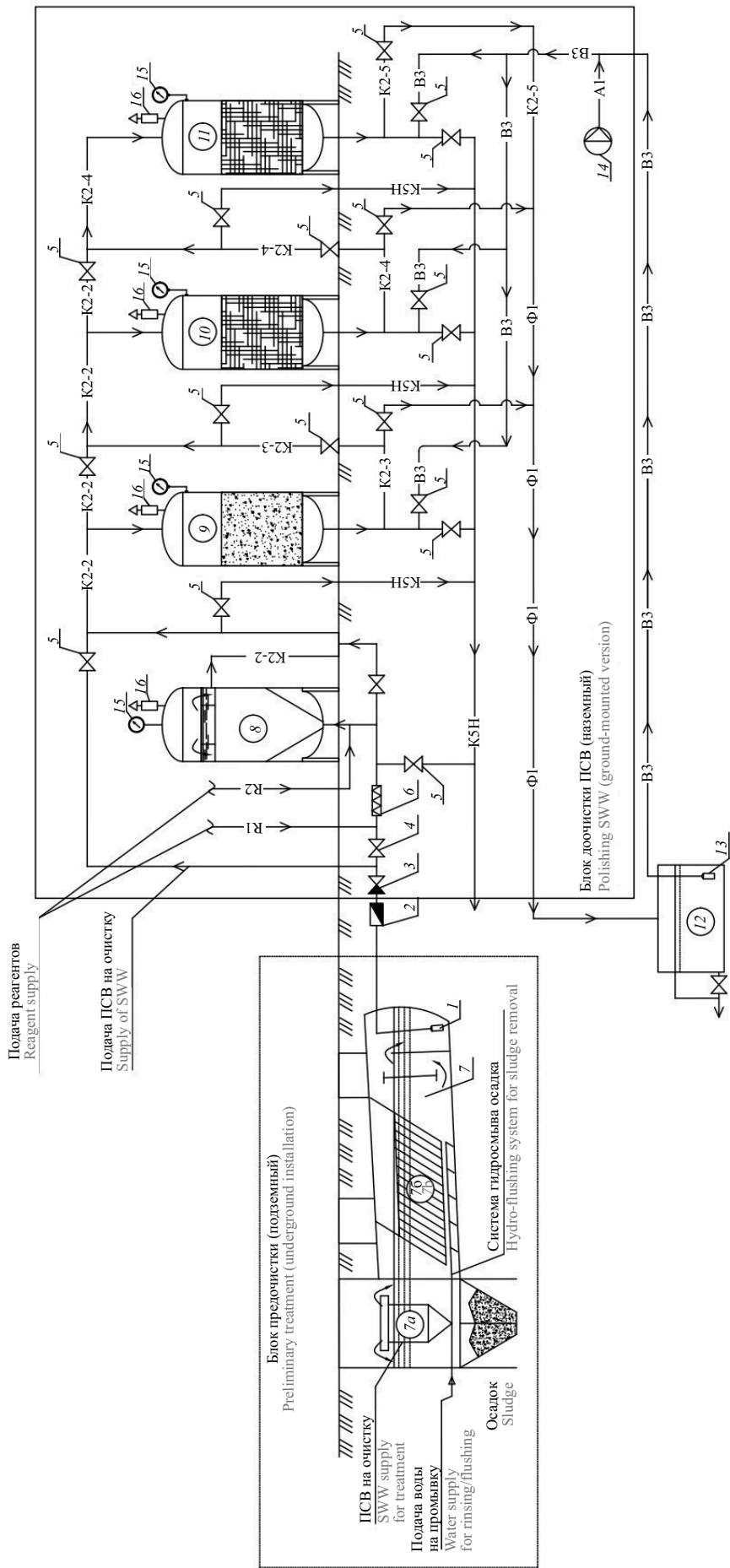


Рис. 4. Технологическая схема установки очистки ПСВ в комплексе с наземным блоком доочистки: 1 — насосный агрегат; 2 — расходомер; 3 — обратный клапан; 4 — регулирующий клапан; 5 — кран; 6 — смеситель статический; 7 — комбинированный резервуар-отстойник; 7а — гидродиффузор; 7б — блок тонкослойного отстаивания; 8 — вихревой смеситель с камерой хлопьеобразования; 9 — контактный (механический) фильтр; 10 — ионообменный фильтр; 11 — сорбционный фильтр; 12 — сборная емкость очищенных ПСВ; 13 — насос подачи воды для промывки фильтров; 14 — компрессор; 15 — манометр; 16 — воздухоотводчик

Fig. 4. Process flow diagram of the SWW purification unit with a ground-based post-treatment unit: 1 — pump unit; 2 — flow meter; 3 — check valve; 4 — control valve; 5 — valve; 6 — static mixer; 7 — combined settling tank; 7a — hydrodiffuser; 7b — fine-layer settling unit; 8 — vortex mixer with flocculating chamber; 9 — contact (mechanical) filter; 10 — ion exchange filter; 11 — sorption filter; 12 — cleaned SWW collection tank; 13 — filter backwash water pump; 14 — compressor; 15 — pressure gauge; 16 — air vent

его на обезвоживание (получен патент на полезную модель RU № 207418U1 «Устройство для очистки поверхностных сточных вод» [22]);

- наземный — фильтрационно-сорбционная установка доочистки ПСВ до уровня нормативных требований на сброс в водные объекты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для применения проточных систем очистки ПСВ на конкретном объекте необходимо проводить технологические расчеты в соответствии с новыми нормами проектирования, а также соблюдать соответствие качества очистки заявленной эффективности и нормам отведения в водные объекты. Однако достижение нормативов очистки на существующих проточных сооружениях невозможно, поэтому требуется совершенствование технологий и технологических схем, учитывающих уже имеющиеся конструкции очистных сооружений, включая емкостные, выполненные из современных композитных материалов с высокими прочностными характеристиками.

Экспериментально подтверждено, что в течение действующего природоохранного законодательства локальные сооружения очистки ПСВ из композитных материалов в случае соответствующей конструктивной доработки могут использоваться

как сооружения предварительной механической очистки ПСВ при отведении их в централизованные системы водоотведения поселений (общесплавные, ливневые и комбинированные), а при использовании фильтрационно-сорбционной установки доочистки и в водные объекты с соблюдением в черте города санитарно-гигиенических нормативов, приведенных в СанПиН 1.2.3685–21.

Моделирование процесса очистки ПСВ на фильтрах лабораторной модели и опытно-промышленной установки при загрузке различными фильтрующими материалами, подтвержденное результатами анализов проб ПСВ, показало, что перспективным направлением повышения технологической надежности локальных установок очистки ПСВ является использование двух блоков:

- подземного — установки предварительной механической очистки ПСВ с системами сбора и удаления нефтепродуктов, гидросмыва осадка и удаления его на обезвоживание;

- наземного — фильтрационно-сорбционной установки доочистки ПСВ до уровня нормативных требований на сброс в водные объекты.

Применение композитных материалов для корпусов установок проточного типа обеспечивает их высокую конструктивную прочность и долговечность.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Верецагина Л.М.* Проблемы очистки поверхностного стока с территории городов и промышленных предприятий // *Вода Magazine*. 2008. № 2 (6). С. 24–28.

2. *Melville-Shreeve P., Ward S., Butler D.* Rainwater harvesting typologies for UK houses: a multi criteria analysis of system configurations // *Water*. 2016. Vol. 8. Issue 4. P. 129. DOI: 10.3390/w8040129

3. *Gunawardena J.M.A., Liu A., Egodawatta P., Ayoko G.A., Goonetilleke A.* Influence of Traffic and Land Use on Urban Stormwater Quality // *SpringerBriefs in Water Science and Technology*. 2018. DOI: 10.1007/978-981-10-5302-3

4. *Wijesiri B., Liu A., Egodawatta P., McGree J., Goonetilleke A.* Decision Making with Uncertainty in Stormwater Pollutant Processes // *SpringerBriefs in Water Science and Technology*. 2019. DOI: 10.1007/978-981-13-3507-5

5. *Pla C., Benavente D., Valdes-Abellan J., Kovacova Z.* Effectiveness of two lightweight aggregates for the removal of heavy metals from contaminated urban stormwater // *Journal of Contaminant Hydrology*. 2021. Vol. 239. P. 103778. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2021.103778. EDN CFYQCO.

6. *Tondera K., Blecken G.T., Chazarenc F., Tanner C.C.* Ecotechnologies for the Treatment of Variable Stormwater and Wastewater Flows // *Springer-*

Briefs in Water Science and Technology. 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-70013-7

7. *Феофанов Ю.А., Мишуков Б.Г.* Особенности формирования состава поверхностных сточных вод и выбор сооружений по их очистке // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2017. № 3 (71). С. 49–66. DOI: 10.23968/2305-3488.2017.21.3.49-66. EDN ZUEHKX.

8. *Духонельникова Н.* Поверхностные сточные воды, система отведения и их очистка в крупных городах // *AlfaBuild*. 2018. № 1 (3). С. 7–14. EDN LBFHKL.

9. *Галкин Ю.А.* Основные решения по системе сбора, регулирования и очистки сточных вод промышленно-ливневой канализации Екатеринбурга // *Водоснабжение и канализация*. 2014. № 1–2. С. 71–75. EDN SCHGDD.

10. *Стрелков А.К., Шувалов М.В., Павлухин А.А., Черноswiftов М.Д.* Реконструкция сетей дождевой канализации в исторической границе города Самары // *Градостроительство и архитектура*. 2023. Т. 13. № 1 (50). С. 45–52. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.01.06. EDN KFACPD.

11. *Чечевичкин В.Н., Ватин Н.И.* Особенности состава и очистки поверхностного стока крупных городов // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 6 (50). С. 67–74. DOI: 10.5862/MCE.50.7. EDN STAFED.

12. Верецагина Л.М. Нормы проектирования систем отведения и очистки поверхностных сточных вод и неурегулированные требования водохозяйственного законодательства // Водоснабжение и санитарная техника. 2023. № 1. С. 19–25. DOI: 10.35776/VST.2023.01.03. EDN TMWTES.

13. Кузьмич В.Н., Миллер Е.Г. О необходимости внесения изменений в нормативно-правовое регулирование воздействия хозяйственной и иной деятельности на поверхностные водные объекты // Водоснабжение и санитарная техника. 2023. № 10. С. 10–21. DOI: 10.35776/VST.2023.10.02. EDN QUPFTZ.

14. Balascio C.C., Lucas W.C. A survey of stormwater management water quality regulations in four Mid-Atlantic States // Journal of Environmental Management. 2009. Vol. 90. Issue 1. Pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.jenvman.2007.10.006

15. Палагин Е.Д., Стрелков А.К., Павлухин А.А., Быкова П.Г. О нормировании обращения с поверхностными сточными водами // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 12. С. 15–20. DOI: 10.35776/VST.2022.12.03. EDN QZIXRZ.

16. Tondera K., Blecken G.T., Chazarenc F., Tanner C.C. Ecotechnologies for the Treatment of Variable Stormwater and Wastewater Flows // Springer-Briefs in Water Science and Technology. 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-70013-7

17. Шувалов М.В., Палагин Е.Д., Павлухин А.А., Авдеев П.П. Техничко-экономическое сравнение вариантов отведения поверхностных сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2025. № 11. С. 55–60. DOI: 10.35776/VST.2025.11.08. EDN NCYAPR.

18. Верецагина Л.М., Худякова Д.Д., Громов Г.Н. Основные направления совершенствования технологических схем и конструкций установок для очистки поверхностных сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 4. С. 34–42. DOI: 10.35776/VST.2022.04.05. EDN IKNOUL.

19. Волков С.Н., Лукьянчук М.Ю., Житенев А.И., Рублевская О.Н., Ерофеев В.В., Игнатчик В.С. и др. Системы отведения поверхностного стока: проблемы и решения (в порядке обсуждения) // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 7. С. 53–60. DOI: 10.35776/VST.2022.07.07. EDN TVTAOO.

20. Волков С.Н., Лукьянчук М.Ю., Жукова А.Г., Солохин А.А., Кузьмин В.А., Житенев А.И. и др. Обоснование оптимального варианта адаптации системы водоотведения Санкт-Петербурга к условиям совокупного влияния урбанизации и изменения климата. Часть 4. Обоснование вида модели для управления системой водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. 2025. № 6. С. 9–18. DOI: 10.35776/VST.2025.06.02. EDN ROZMUY.

21. Волков С.Н., Лукьянчук М.Ю., Жукова А.Г., Солохин А.А., Кузьмин В.А., Житенев А.И. и др. Обоснование оптимального варианта адаптации системы водоотведения Санкт-Петербурга к условиям совокупного влияния урбанизации и изменения климата. Часть 2. Результаты обоснования оптимального варианта // Водоснабжение и санитарная техника. 2025. № 4. С. 28–35. DOI: 10.35776/VST.2025.04.04. EDN KWIMCR.

22. Патент RU № 207418U1. Устройство для очистки поверхностных сточных вод / Байбородин А.П., Верецагина Л.М., Громов Г.Н., Данилов И.А., Сухомлинов В.П., Худякова Д.Д.; опубл. 27.10.2021. Бюл. № 30.

Поступила в редакцию 1 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 3 апреля 2026 г.

Одобрена для публикации 18 апреля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Дарья Дмитриевна Худякова — главный специалист; АО «Мосводоканал»; 105005, г. Москва, Плетешковский пер., д. 2; Scopus: 57205221327, ORCID: 0000-0002-4174-9937; darya.khudyakova.94@mail.ru;

Олег Григорьевич Примин — доктор технических наук, профессор; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 1918-0125, Scopus: 570860800, ResearcherID: AAI-3527-2020, ORCID: 0000-0002-9641-8545; tepper2007@yandex.ru;

Григорий Николаевич Громов — кандидат технических наук, доцент; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 56991330600, ResearcherID: AAI-3833-2020, ORCID: 0000-0002-3655-4000; gromov_grigorii@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Vereshchagina L.M. Problems of surface runoff treatment from urban and industrial areas. *Water Magazine*. 2008; 2(6):24-28. (rus.).
2. Melville-Shreeve P., Ward S., Butler D. Rainwater harvesting typologies for UK houses: a multi criteria analysis of system configurations. *Water*. 2016; 8(4):129. DOI: 10.3390/w8040129
3. Gunawardena J.M. A., Liu A., Egodawatta P., Ayoko G.A., Goonetilleke A. Influence of Traffic and Land Use on Urban Stormwater Quality. *Springer-Briefs in Water Science and Technology*. 2018. DOI: 10.1007/978-981-10-5302-3
4. Wijesiri B., Liu A., Egodawatta P., McGree J., Goonetilleke A. Decision Making with Uncertainty in Stormwater Pollutant Processes. *SpringerBriefs in Water Science and Technology*. 2019. DOI: 10.1007/978-981-13-3507-5
5. Pla C., Benavente D., Valdes-Abellan J., Kovacova Z. Effectiveness of two lightweight aggregates for the removal of heavy metals from contaminated urban stormwater. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2021; 239:103778. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2021.103778. EDN CFYQCO.
6. Ewert J., O'Halloran D., Lintern A., Weber T., McCarthy D. *Ecotechnologies for the Treatment of Variable Stormwater and Wastewater Flow : review of stormwater science*. 2018; 24-33.
7. Feofanov Yu.A., Mishukov B.G. Features of formation of surface sewage composition and selection of facilities for their purification. *Water and Ecology*. 2017; 3(71):49-66. DOI: 10.23968/2305-3488.2017.21.3.49-66. EDN ZUEHKX. (rus.).
8. Dukhopelnikova N.D. Surface waste water, the water disposal system and water purifying in the big city. *AlfaBuild*. 2018; 1(3):7-14. EDN LBFHKL. (rus.).
9. Galkin Y.A. Key solutions for wastewater collection, regulation, and treatment in Yekaterinburg's industrial-storm sewer system. *Water Supply and Sewerage*. 2014; 1-2:71-75. EDN SCHGDD. (rus.).
10. Strelkov A.K., Shuvalov M.V., Pavluhin A.A., Chernosvitov M.D. Reconstruction of rain sewer networks in the historical border of the city of Samara. *Urban Construction and Architecture*. 2023; 13(1):(50):45-52. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.01.06. EDN KFACPD. (rus.).
11. Chechevichkin V.N., Vatin N.I. Specifics of surface runoff contents and treatment in large cities. *Magazine of Civil Engineering*. 2014; 6(50):67-74. DOI: 10.5862/MCE.50.7. EDN STAFED. (rus.).
12. Vereshchagina L. Standards for designing systems for the removal and treatment of surface runoff and unsettled requirements of the water protection legislation. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2023; 1:19-25. DOI: 10.35776/VST.2023.01.03. EDN TMWTES. (rus.).
13. Kuz'mich V., Miller E. On the need for making amendments to the statutory regulation of impact of the business operations and other activities on the surface water bodies. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2023; 10:10-21. DOI: 10.35776/VST.2023.10.02. EDN QUPFTZ. (rus.).
14. Balascio C.C., Lucas W.C. A survey of stormwater management water quality regulations in four Mid-Atlantic States. *Journal of Environmental Management*. 2009; 90(1):1-7. DOI: 10.1016/j.jenvman.2007.10.006
15. Palagin E., Strelkov A., Pavlukhin A., Bykova P. On the regulation of surface runoff handling. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2022; 12:15-20. DOI: 10.35776/VST.2022.12.03. EDN QZIXRZ. (rus.).
16. Tondera K., Blecken G.T., Chazarenc F., Tanner C.C. Ecotechnologies for the Treatment of Variable Stormwater and Wastewater Flows. *SpringerBriefs in Water Science and Technology*. 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-70013-7
17. Shuvalov M., Palagin E., Pavlukhin A., Avdeenkov P. Engineering and economical comparison of the surface runoff disposal options. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2025; 11:55-60. DOI: 10.35776/VST.2025.11.08. EDN NCYAPR. (rus.).
18. Vereshchagina L., Khudiakova D., Gromov G. Principal directions for improving process flow schemes and designs of units for surface runoff treatment. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2022; 4:34-42. DOI: 10.35776/VST.2022.04.05. EDN IKNOUL. (rus.).
19. Volkov S., Luk'ianchuk M., Zhitenev A., Rublevskaia O., Erofeev V., Ignatchik V. et al. Systems for the removal of surface runoff: problems and solutions (for discussion). *Water Supply and Sanitary Technique*. 2022; 7:53-60. DOI: 10.35776/VST.2022.07.07. EDN TVTAOO. (rus.).
20. Volkov S., Luk'ianchuk M., Zhukova A., Solokhin A., Kuz'min V., Zhitenev A. et al. Justification of the optimum alternative of the wastewater disposal system of St. Petersburg adapting to the conditions of the joint effect of urbanization and climate change. Part 4. Justification of the type of model for the management of a wastewater disposal system. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2025; 6:9-18. DOI: 10.35776/VST.2025.06.02. EDN ROZMUY. (rus.).
21. Volkov S., Luk'ianchuk M., Zhukova A., Solokhin A., Kuz'min V., Zhitenev A. et al. Justification of the optimum alternative of the wastewater disposal system of St. Petersburg adapting to the conditions of the joint effect of urbanization and climate change. Part 2. Results of substantiation of the optimum alternative. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2025; 4:28-35. DOI: 10.35776/VST.2025.04.04. EDN KWIMCR. (rus.).
22. Patent RU No. 207418U1. *Device for treating surface wastewater* / Baiborodin A.P., Vereshchagina L.M., Gromov G.N., Danilov I.A., Sukhomlinov V.P., Khudyakova D.D.; publ. 27.10.2021. Bull. No. 30.

Received December 1, 2025.

Adopted in revised form on April 3, 2026.

Approved for publication on April 18, 2026.

B I O N O T E S: **Darya D. Khudyakova** — Chief Specialist; **JSC “Mosvodokanal”**; 2 Pleteshkovsky pereulok, Moscow, 105005, Russian Federation; Scopus: 57205221327, ORCID: 0000-0002-4174-9937; darya.khudyakova.94@mail.ru;

Oleg G. Primin — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 1918-0125, Scopus: 570860800, ResearcherID: AAI-3527-2020, ORCID: 0000-0002-9641-8545; tepper2007@yandex.ru;

Grigoriy N. Gromov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 56991330600, ResearcherID: AAI-3833-2020, ORCID: 0000-0002-3655-4000; gromov_grigorii@mail.ru.

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

The authors declare no conflict of interest.

Очистка нефтесодержащих сточных вод с применением
поверхностно-модифицированных ультрафильтрационных
мембран

Александр Сергеевич Ильиных, Евгений Васильевич Мигалатий

Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина (УрФУ); г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлены результаты исследования модифицированных полимерных ультрафильтрационных мембран, применяемых для разделения стабильной эмульсии технологических вод оборотных циклов водоснабжения, трубоэлектросварочных цехов, тепловыделяющей сборки металлургического предприятия.

Материалы и методы. Эксперименты по фильтрации сточных вод с содержанием коллоидно-растворенных и взвешенных примесей нефтепродуктов проводили при поддержании постоянного давления фильтрации 0,2 МПа. Режим фильтрации тупиковый. Перед каждой серией экспериментов в эмульсию вводили коагулянт в установленных дозах. Процесс фильтрации выполняли с использованием лабораторной фильтрационной ячейки. В качестве фильтрующего элемента применяли полуволоконную ультрафильтрационную мембрану из поливинилиденфторида. Для повышения гидрофильности поверхность мембраны подвергали двухступенчатой модификации с последовательной обработкой растворами таниновой кислоты и перманганата калия в буферных растворах с различным значением pH.

Результаты. Установлено, что модифицированные мембраны обеспечивают высокую степень удаления нефтепродуктов и органических соединений, определяющих химическое потребление кислорода (ХПК). Определена оптимальная доза коагулянта — 20–25 мг/дм³ по Fe³⁺, при которой достигается минимальное содержание нефтепродуктов (до 0,2 мг/дм³) и ХПК (до 190 мг/дм³) в фильтрате. Удельная производительность мембран составила 17–12 л/(ч·м²) при дозах коагулянта 5–25 мг/дм³. Дальнейшее увеличение дозы коагулянта нецелесообразно из-за отсутствия значимого улучшения эффективности очистки и роста затрат на реагенты.

Выводы. Полученные результаты подтверждают перспективность применения модифицированных ультрафильтрационных мембран для удаления эмульгированных нефтепродуктов при очистке и доочистке сточных вод.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ультрафильтрация, модифицированные мембраны, нефтесодержащие сточные воды, стабильная эмульсия, удельная производительность, эмульгированные нефтепродукты, мембранные технологии, гидрофильная модификация

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ильиных А.С., Мигалатий Е.В. Очистка нефтесодержащих сточных вод с применением поверхностно-модифицированных ультрафильтрационных мембран // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 7. С. 1181–1193. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1181-1193

Автор, ответственный за переписку: Александр Сергеевич Ильиных, as_ilinykh@mail.ru.

Treatment of oil-containing wastewater using surface-modified
ultrafiltration membranes

Alexander S. Ilyinykh, Evgeny V. Migalatiy

Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU);
Yekaterinburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The results of the study of modified polymer ultrafiltration membranes used to separate stable emulsions of process waters of circulating water supply cycles, pipe and electric welding shops, and the heat-generating assembly of a metallurgical enterprise are presented.

Materials and methods. Experiments on filtration of wastewater containing colloiddally dissolved and suspended impurities of petroleum products were carried out while maintaining a constant filtration pressure of 0.2 MPa. The filtering mode is dead-end. Before each series of experiments, the emulsion was injected with coagulant in prescribed doses. The filtration process was performed using a laboratory filtration cell. A hollow fibre ultrafiltration membrane made of polyvinylidene fluoride was used as a filter element. To increase hydrophilicity, the membrane surface was subjected to a two-stage modification with sequential treatment with solutions of tannic acid and potassium permanganate in buffer solutions with different pH values.

Results. It was found that the modified membranes provide a high degree of removal of petroleum products and organic compounds that determine the COD value. The optimal coagulant dose was determined to be 20–25 mg/L of Fe³⁺, at which

the minimum content of petroleum products (up to 0.2 mg/L) and COD (up to 190 mg/L) in the filtrate is achieved. The specific productivity of the membranes was 17–12 L/(h·m²) at coagulant doses of 5–25 mg/L. A further increase in the coagulant dose is not advisable due to the lack of significant improvement in treatment efficiency and the increase in reagent costs.

Conclusions. The results obtained confirm the promise of using modified ultrafiltration membranes for the removal of emulsified petroleum products during wastewater treatment and post-treatment.

KEYWORDS: ultrafiltration, modified membranes, oil-containing wastewater, stable emulsion, specific productivity, emulsified petroleum products, membrane technologies, hydrophilic modification

FOR CITATION: Ilyinykh A.S., Migalatiy E.V. Treatment of oil-containing wastewater using surface-modified ultrafiltration membranes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(7):1181-1193. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1181-1193 (rus.).

Corresponding author: Alexander S. Ilyinykh, as_ilyinykh@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие промышленности и процессы урбанизации сопровождаются увеличением объемов сброса сточных вод с начала XX в., а также различными техногенными авариями и разливами нефти, что приводит к образованию значительного количества нефтепродуктов в водных объектах. Такие сбросы представляют серьезную угрозу устойчивости природных экосистем [1]. Недостаточная эффективность эксплуатируемых очистных сооружений усугубляет данную проблему, поскольку существенная часть загрязненных сточных вод продолжает поступать в водные объекты. Так, например, в Свердловской области, согласно государственному докладу (2024)¹, нормативную очистку обеспечивают лишь 44,2 % (165 из 373) комплексов, сбрасывающих очищенные стоки в водные объекты. Доля загрязненных стоков при этом достигает 75 %. Особую сложность представляют нефтесодержащие стоки, которые необходимо обрабатывать перед любым видом утилизации. Технологии замкнутого водоснабжения и «нулевого» сброса не решают проблему полностью — сброс и аккумуляция таких стоков продолжаются. Источниками нефтесодержащих сточных вод могут быть предприятия нефтегазовой, нефтехимической, текстильной, металлообрабатывающей и других областей промышленности. В металлургии и машиностроении широко применяются смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), которые используются для охлаждения и смазки металлообрабатывающего инструмента и деталей машин [2, 3]. СОЖ — многокомпонентные, сложные по составу нефтесодержащие жидкости, подразделяются на: масляные СОЖ, основу которых составляют минеральные или синтетические масла высокой степени очистки, и водосмешиваемые СОЖ. Последние, в свою очередь, включают грубодисперсные эмульсии минерального масла в воде (эмульсолы); микроэмульсии с пониженным содержанием масла (полусинтетические СОЖ); а также водные растворы поверхностно-активных веществ (ПАВ) и полимеров, практически не содержащие минерального масла (синтетические СОЖ) [4, 5]. В процессе

эксплуатации СОЖ подвергаются загрязнению продуктами износа, металлами, поверхностно-активными веществами и микроорганизмами, вследствие чего образуются значительные объемы отработанных смазочно-охлаждающих жидкостей. Отработанные СОЖ в большинстве случаев сбрасываются в виде нефтесодержащих сточных вод металлургических и машиностроительных предприятий [6]. По оценкам, ежегодно используется более 2 млн м³ СОЖ, при этом объем сточных вод, образующихся в результате их разбавления, в десятки раз превышает исходный объем концентрированных растворов [5]. Наличие в таких стоках устойчивых эмульсий, токсичных компонентов и трудноудаляемых примесей обуславливает высокие требования к эффективности очистки [7].

Традиционные методы обработки нефтесодержащих сточных вод, такие как гравитационное отстаивание, адсорбция, флотация и центрифугирование характеризуются ограниченной эффективностью либо высокими энергетическими затратами [8]. Эти методы преимущественно эффективны при удалении нефтепродуктов диаметром >10 мкм и существенно уступают при обработке устойчивых эмульсий типа «масло в воде» с диаметром капель от 0,1 до 10 мкм. В связи с вышесказанным актуальной задачей считается разработка экономически целесообразных методов, обеспечивающих эффективное разделение эмульсий указанного типа [9]. Среди современных методов очистки особый интерес представляют мембранные технологии, которые рассматриваются как одни из наиболее перспективных для обработки нефтесодержащих эмульсий благодаря отсутствию фазового перехода, простоте процесса и низкому энергопотреблению [9, 10]. Несмотря на ряд преимуществ, мембранным процессам свойственно образование маслянистых осадков на мембране, которые возникают в процессе фильтрации масло-эмульсионных стоков металлообработки [11].

В настоящей работе рассматривается применение ультрафильтрационных мембран из поливинилиденфторида (PVDF) — полимера с высокой физико-химической стабильностью и механической прочностью, широко используемого в процессах микрофильтрации, ультрафильтрации, нанофильтрации, обратного осмоса, мембранных биореакторах

¹ Государственный доклад о состоянии окружающей среды на территории Свердловской области в 2024 году / ред. А.В. Сафронов и др. Екатеринбург: 2025.

[12–18]. Однако гидрофобность поверхности PVDF мембран обуславливает их высокую склонность к загрязнению при фильтрации эмульсий типа «масло в воде», что приводит к снижению проницаемости, уменьшению эксплуатационного ресурса и росту эксплуатационных затрат [19, 20]. Для повышения гидрофильности и снижения скорости образования загрязнений PVDF мембран активно разрабатываются различные методы модификации поверхности: физическое смешивание, поверхностная сегрегация, химическая прививка и биоадгезивная модификация [21–30]. Несмотря на высокую эффективность данные методы зачастую характеризуются технологической сложностью применения и ограниченной масштабируемостью. Одним из наиболее перспективных методов является биоадгезивная модификация поверхности мембран [31]. Этот метод отличается простотой нанесения, высокой стабильностью покрытий и отсутствием необходимости сложной постобработки. Вместе с тем использование модифицирующих веществ сопровождается рядом недостатков, включая высокую стоимость и неоднородность образующихся покрытий.

В последние годы в качестве альтернативных биоадгезивных веществ рассматриваются растительные полифенолы, такие как галловая кислота и таниновая кислота (ТК) [32, 33]. Среди них ТК выделяется благодаря своим преимуществам: низкой стоимости, доступности и способности формировать устойчивые покрытия на поверхности мембран за счет образования ковалентных и нековалентных связей в слабощелочной среде [32–35]. В работах показано, что ТК может образовывать композитные покрытия в сочетании с ионами металлов, силановыми агентами и полимерами, обеспечивая высокую гидрофильность поверхности [27, 36, 37].

Цель настоящего исследования — определение влияния дозы коагулянта на эффективность очистки водонефтяных эмульсий с использованием поверхностно-модифицированной мембраны. Установление оптимального расхода реагента позволит повысить степень очистки и оптимизировать экономические показатели процесса путем снижения химических затрат и рационального выбора режима фильтрации и регенерации мембраны.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучается применение поверхностно-модифицированных мембран для разделения эмульсий технологических вод оборотных циклов водоснабжения (далее — ЦХП), трубоэлектросварочных цехов (ТЭСЦ), тепловыделяющей сборки (ТВС) металлургических предприятий. Разделение сточных вод с добавлением различных доз коагулянта при поддержании постоянного давления разделения рассматривали с целью определения оптимальной дозировки реагента. Способ поверхностной модификации мембраны с применением таниновой кислоты и последующим окисле-

нием перманганатом калия (ПК) описан в работе [38] и патенте [39]. В качестве мембраны использовалась половолоконная ультрафильтрационная мембрана из PVDF в связи с ее высокими механическими прочностными характеристиками. Двухэтапная модификация мембраны обеспечила улучшение эффективности очистки и повышение противообрастающих свойств за счет образования гидрофильного слоя на поверхности. Выбор таниновой кислоты в качестве модифицирующего реагента обусловлен ее полифенольной структурой, способствующей формированию устойчивых водородных связей и образованию гидрофильного слоя на поверхности, что позволяет снизить сорбцию гидрофобных органических соединений. Перманганат калия, в свою очередь, используется как окислитель, обеспечивающий закрепление функциональных групп и стабильность модифицированного покрытия. Совместное применение реагентов дает возможность повысить гидрофильность мембран при минимальном воздействии на их структуру. В качестве коагулянта применяли хлорид железа (III); расчет дозировки осуществлялся по иону Fe^{3+} .

Подготовка и модификация мембран. В качестве объектов исследования выбраны ультрафильтрационные мембраны из PVDF (UF, средний диаметр пор 0,06 мкм). Экспериментальные мембранные модули были изготовлены на основе волокон ультрафильтрационных мембран, произведенных в промышленных условиях. В качестве реагентов для гидрофилизации поверхности мембраны использовали таниновую кислоту ($\text{C}_{76}\text{H}_{52}\text{O}_{46}$), перманганат калия (KMnO_4), буферные растворы pH 5,5 и 9,2. Применяли реальные сточные воды одного из металлургического предприятий Уральского региона. Перед и после проведения модификации мембраны промывали в дистиллированной воде для удаления остатков консервантов и модифицирующих веществ соответственно. Анализ качества фильтрованного стока на содержание нефтепродуктов выполняли методом ИК-спектроскопии, химическое потребление кислорода (ХПК) определяли согласно ГОСТ 31859–2012 «Вода. Метод определения химического потребления кислорода».

Характеристика сточной жидкости. Объектом очистки служили отработанные эмульсии технологических вод ЦХП, ТЭСЦ и ТВЦ металлургических предприятий Уральского региона. Данный тип сточной жидкости образуется в результате механообработки металлов и содержит устойчиво эмульгированные нефтепродукты, представляет собой сложную многокомпонентную систему. Состав отработанной СОЖ может варьироваться в зависимости от исходного продукта и содержать следующие компоненты: вода; минеральные масла; эмульгаторы/ПАВ; ингибиторы коррозии; биоциды; органические кислоты, которые образуются при разложении компонентов СОЖ. По результатам анализа отработанных эмульсий ХПК составило 2600 мг/дм^3 , содержание нефтепродуктов — $16,4 \text{ мг/дм}^3$.

Проведение мембранной фильтрации. Фильтрацию эмульсии осуществляли с использованием ранее описанной модифицированной мембраны, режим фильтрации тупиковый при поддержании давления 0,2 МПа. Объем очищенного стока составлял 70 % от исходного объема, загрязненная промывная вода — 30 %. Было выполнено пять серий экспериментов при различных дозах коагулянта: 5–25 мг/дм³ (по Fe³⁺). Продолжительность каждой серии — 4 ч. Фильтрационный цикл включал 5 мин прямой фильтрации, после чего выполняли обратную промывку мембраны фильтратом с заданной интенсивностью. Длительность обратной промывки — 10 с.

Ход работы. Все эксперименты по выделению водонефтяных эмульсий проводили при постоянном давлении фильтрации (0,2 МПа) на фильтровальной ячейке, в тупиковом режиме. Расход устанавливали объемным методом. В процессе экспериментов по очистке раствор заливали в емкость исходной воды, подготовленную гидрофилизированную ультрафильтрационную мембрану помещали в фильтровальную ячейку, запускали насос подачи исходного стока для создания и поддержания заданного давле-

ния. Фильтрат после мембраны отбирали для определения проницаемости и эффективности очистки. Обратную промывку производили фильтратом с помощью насоса промывной воды.

Эффективность разделения растворов на модифицированных мембранах. Качество очищенных сточных вод оценивали по показателям ХПК и содержанию нефтепродуктов, находящихся в свободном, эмульгированном и растворенном состояниях. Указанные показатели были выбраны как диктующие (приоритетные) при выборе технологической схемы очистки для производственного водоснабжения, так как позволяют оперативно отследить качество воды, отражают суммарную концентрацию органических веществ и степень удаления углеводородных загрязнений.

Расход J определяли объемным методом по формуле:

$$J = \frac{V}{\Delta t \cdot A}, \text{ л/(ч} \cdot \text{м}^2),$$

где V — объем исходного раствора, л; Δt — время фильтрации, ч; A — площадь поверхности мембраны, м².

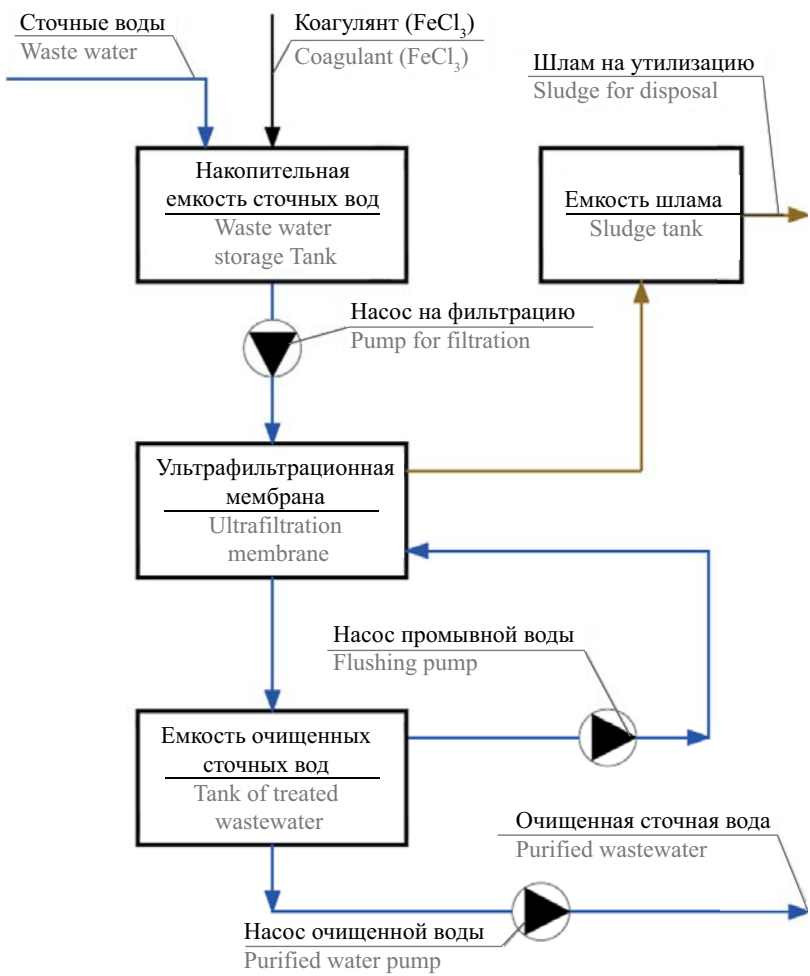


Рис. 1. Принципиальная схема фильтрационной мембранной установки

Fig. 1. Schematic diagram of the filtration membrane unit

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты выполняли на лабораторной установке (рис. 1, 2). Установка состоит из насоса подачи исходной воды, насоса промывной воды, емкостей исходной воды, промывной воды и сбора фильтрата, запорно-регулирующей арматуры, манометра, фильтрационной ячейки и мембранного элемента.

Исследована динамика проникновения загрязняющих веществ, определяющих уровень ХПК, через поверхность полупроницаемой модифицированной и немодифицированной мембраны в образцах стока с различными дозами хлорида железа. Результаты измерений удельной производительности и величины ХПК очищенного стока модифицированной и немодифицированной мембран представлены на рис. 3.

Как видно из графика (рис. 3), с увеличением дозы хлорида железа происходит снижение ХПК в фильтрате модифицированной мембраны от 1267 до 188 мг/дм^3 для минимальной и максимальной дозы коагулянта соответственно. При минимальных и средних дозах хлорида железа наблюдается наибольший эффект снижения ХПК. Увеличение дозы коагулянта до 25 мг/дм^3 по Fe^{3+} оказывало меньшее влияние на снижение ХПК фильтрата. Такое увеличение дозы реагента авторы считают нецелесообразным из-за роста затрат при незначительном повышении эффективности.

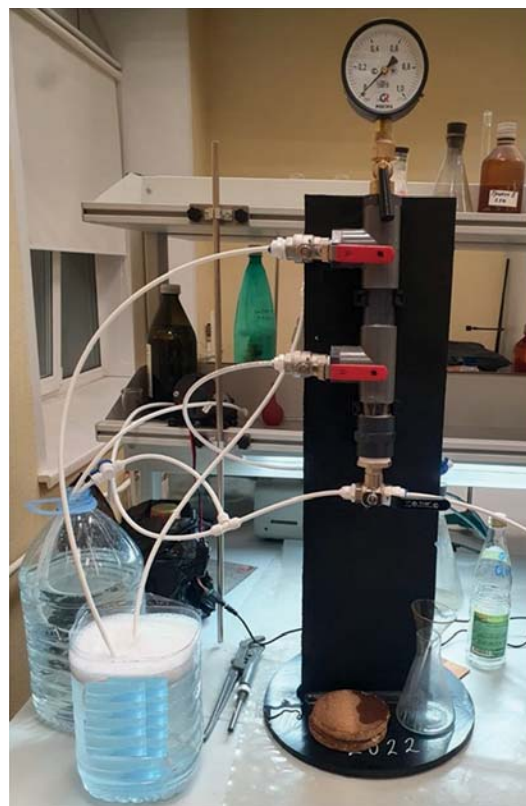


Рис. 2. Внешний вид фильтрационной установки

Fig. 2. Exterior view of the filtration unit

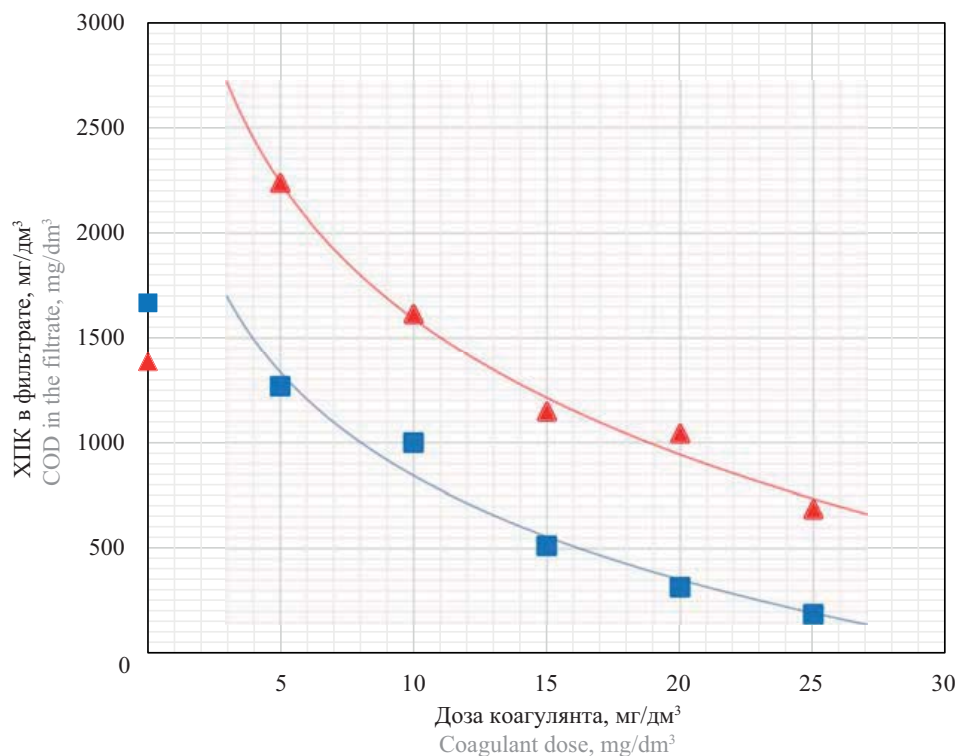


Рис. 3. Химическое потребление кислорода в фильтрате мембран в зависимости от дозы коагулянта: $\blacktriangle$ — химическое потребление кислорода в фильтрате немодифицированной мембраны, мг/дм^3 ; $\blacksquare$ — химическое потребление кислорода в фильтрате модифицированной мембраны, мг/дм^3

Fig. 3. COD in the membrane filtrate in dependence of the coagulant dose: $\blacktriangle$ — chemical oxygen demand in the filtrate of the unmodified membrane, mg/dm^3 ; $\blacksquare$ — chemical oxygen consumption in the modified membrane filtrate, mg/dm^3

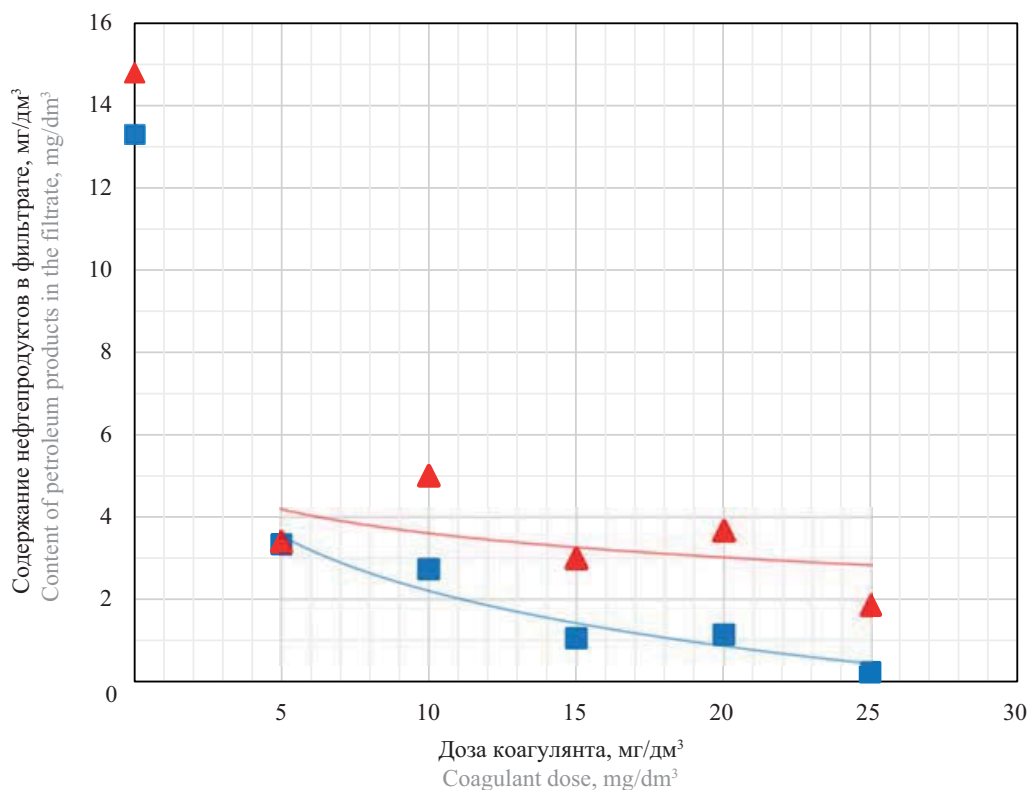


Рис. 4. Содержание нефтепродуктов в фильтрате мембран в зависимости от дозы коагулянта: ▲ — содержание нефтепродуктов в фильтрате немодифицированной мембраны, мг/дм³; ■ — содержание нефтепродуктов в фильтрате модифицированной мембраны, мг/дм³

Fig. 4. Content of petroleum products in the membrane filtrate in dependence of the dose of coagulant: ▲ — the content of petroleum products in the filtrate of the unmodified membrane mg/dm³; ■ — the content of petroleum products in the filtrate of the modified membrane, mg/dm³

Для немодифицированной мембраны отмечается нелинейная зависимость ХПК от дозы коагулянта. При малой дозе 5 мг/дм³ по Fe^{3+} зафиксировано высокое значение ХПК, вероятно, за счет образования растворимых комплексов или недостаточной коагуляции. Дальнейшее увеличение дозы до 25 мг/дм³ по Fe^{3+} приводит к постепенному снижению ХПК с наиболее значительным эффектом при максимальных дозах. В отличие от модифицированной мембраны, где очистка улучшается более линейно, требуется оптимизация дозы коагулянта для избежания ухудшения качества фильтрата. Минимальная величина ХПК также достигается при максимальной дозе, но остается выше, чем у модифицированного образца. Производительность мембраны слабо зависит от дозы коагулянта, оставаясь на уровне порядка 8 л/(ч·м²), что может указывать на компенсацию засорения за счет коагуляционного эффекта. Удельная производительность модифицированного образца оставалась на уровне 13 л/(ч·м²).

Также изучили динамику проникновения нефтепродуктов в фильтрат через поверхность мембран. Результаты измерений удельной производительности и содержания нефтепродуктов очищенного стока модифицированной и немодифицированной мембран представлены на рис. 4.

На рис. 4 видно, что для модифицированных мембран снижение нефтепродуктов в фильтрате 0,2 мг/дм³ происходит пропорционально увеличению дозы коагулянта аналогично предыдущему графику. В этом случае каждое последующее увеличение дозы коагулянта оказывало положительное влияние на снижение нефтепродуктов в фильтрате. Минимальное количество нефтепродуктов было достигнуто при максимальной дозе коагулянта в данном эксперименте.

Для немодифицированной мембраны снижение количества нефтепродуктов происходит нелинейно. Наибольший эффект наблюдается при минимальной дозе коагулянта, где содержание нефтепродуктов снижается до 3,4 мг/дм³. Дальнейшее повышение дозы коагулянта до 25 мг/дм³ обеспечивает плавное снижение нефтепродуктов до 1,9 мг/дм³. Производительность мембраны остается на низком уровне порядка 8 л/(ч·м²) и не зависит от дозы коагулянта. Для модифицированного образца наиболее высокая производительность отмечается при минимальной дозе и снижается с увеличением дозы коагулянта. С целью достижения приемлемой степени очистки немодифицированная мембрана требует более высоких доз коагулянта 20–25 мг/дм³, но даже при этом уступает модифицированной по эффективности очистки.

Удельная производительность мембран при различной дозе коагулянта

Specific capacity of the membrane with different dozes of coagulant

Наименование Description	Модифицированная мембрана Modified membrane			Немодифицированная мембрана Unmodified membrane		
	ХПК, мг/дм ³ COD, mg/dm ³	Нефтепродукты, мг/дм ³ Oil products, mg/dm ³	Удельная произ- водительность, л/(ч·м ²) Specific capacity l/(h·m ²)	ХПК, мг/дм ³ COD, mg/dm ³	Нефтепродукты, мг/дм ³ Oil products, mg/dm ³	Удельная произ- водительность, л/(ч·м ²) Specific capacity l/(h·m ²)
Без добавления FeCl ₃ Without adding FeCl ₃	1667	13,3	12,0	387	14,8	5,6
Доза FeCl ₃ 5 мг/дм ³ (по Fe ³⁺) The dose of FeCl ₃ is 5 mg/dm ³ (according to Fe ³⁺)	1267	3,3	17,1	2235	3,4	7,9
Доза FeCl ₃ 10 мг/дм ³ (по Fe ³⁺) The dose of FeCl ₃ is 10 mg/dm ³ (according to Fe ³⁺)	1000	2,7	15,0	1614	5,0	8,0
Доза FeCl ₃ 15 мг/дм ³ (по Fe ³⁺) The dose of FeCl ₃ is 15 mg/dm ³ (according to Fe ³⁺)	514	1,1	12,6	1147	3,0	8,0
Доза FeCl ₃ 20 мг/дм ³ (по Fe ³⁺) The dose of FeCl ₃ is 20 mg/dm ³ (according to Fe ³⁺)	317	1,1	12,7	1043	3,7	7,8
Доза FeCl ₃ 25 мг/дм ³ (по Fe ³⁺) The dose of FeCl ₃ is 5 mg/dm ³ (according to Fe ³⁺)	188	0,2	13,1	786	1,9	8,0

Для сравнения удельной производительности мембран при различных дозах коагулянта представлены данные в сводной таблице и на рис. 5.

Модифицированная мембрана демонстрирует более высокую производительность на всем диапазоне доз коагулянта. Эффект от введения коагулянта наблюдается уже при минимальной дозе — удельная производительность повышается на 43 %. При дальнейшем увеличении дозы реагента отмечается снижение производительности, что может быть связано с частичной блокировкой пор мембраны. Немодифицированная мембрана также показывает рост производительности при добавлении коагулянта, но в меньшей степени. При дозах свыше 10 мг/дм³ по Fe³⁺ величина удельной производительности стабилизируются на уровне 8,0 л/(ч·м²). Модифицированная мембрана в условиях

коагулированной среды обладает значительно более высокой удельной производительностью. Таким образом, коагулянт оказывает положительное влияние на фильтрацию, особенно для модифицированной мембраны, но требует подбора оптимальной дозы.

Ранее [38] было установлено, что при использовании немодифицированной мембраны производительность снижалась до минимальных значений. Это связано с контактом нефтепродуктов и гидрофобной поверхности мембраны, в результате которого происходят адгезия, деформация и распределение нефтепродуктов по поверхности мембраны, что приводит к закупориванию пор. Модифицированные мембраны благодаря гидрофильному слою демонстрировали более высокую устойчивость к загрязнению и стабильность работы.

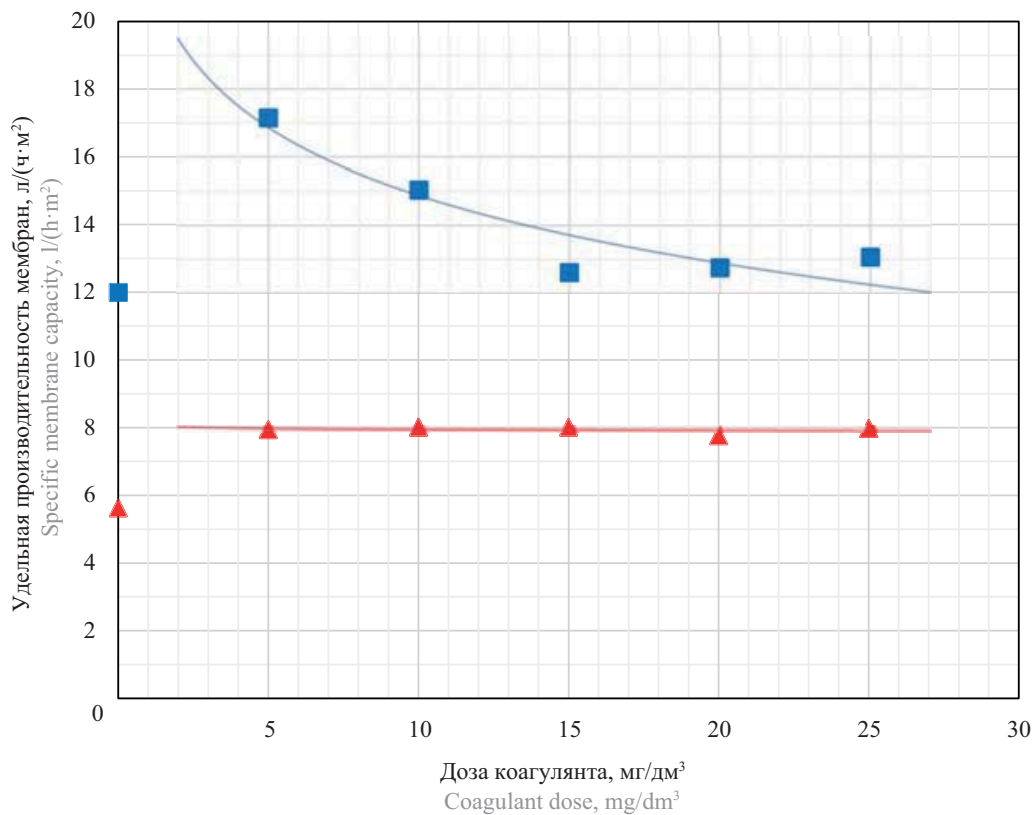


Рис. 5. Зависимость удельной производительности мембран от дозы коагулянта: ▲ — удельная производительность немодифицированной мембраны, л/(ч·м²); ■ — удельная производительность модифицированной мембраны, л/(ч·м²)
Fig. 5. Dependence of the specific membrane capacity on the coagulant dose: ▲ — specific productivity of the unmodified membrane, l/(h·m²); ■ — specific productivity of the modified membrane, l/(h·m²)

Именно модификация поверхности, обеспечивающая гидрофильность мембраны, позволяет существенно снизить адгезию нефтепродуктов на гидрофобной поверхности и повысить эффективность удаления нефтепродуктов. В рассматриваемых условиях степень удаления нефтепродуктов достигала 98 %, при этом удельная производительность оставалась на приемлемом уровне. Следует отметить, что используемые дозы коагулянта значительно ниже, чем при традиционных методах реагентной обработки (гравитационное отстаивание, флотация), где они могут достигать 200 мг/дм³. Фильтрат модифицированной мембраны отличается стабильным составом и соответствует требованиям к технической воде на промышленных предприятиях: ХПК ≤ 190 мг/дм³, нефтепродукты ≤ 0,2 мг/дм³. Такая вода может быть повторно использована в качестве технической на металлургических предприятиях. При необходимости более глубокой очистки возможна установка дополнительной ступени (например, сорбционных фильтров).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представлены результаты применения модифицированных полимерных ультрафильтрационных мембран для разделения устойчивой водонефтяной эмуль-

сии при постоянном давлении 0,2 МПа. Проведенные эксперименты подтвердили высокую эффективность мембран, модифицированных таниновой кислотой и перманганатом калия, в удалении нефтепродуктов и органических веществ, определяющих ХПК. Установлено, что использование хлорида железа (III) в дозировке 20–25 мг/дм³ по Fe³⁺ обеспечивает достижение остаточной концентрации нефтепродуктов не выше 0,2 мг/дм³ и значения ХПК до 190 мг/дм³. Эти показатели соответствуют нормативам для технической воды, используемой в оборотных системах металлургических предприятий. При этом удельная производительность мембраны оставалась на уровне 13–17 л/(ч·м²), что можно считать удовлетворительным для рассматриваемых условий. Для масштабного внедрения данной технологии необходимы дополнительные исследования, направленные на оптимизацию параметров фильтрации, уточнение условий и частоты промывки мембран, определение доз коагулянта с учетом состава сточных вод, а также проведение технико-экономического анализа, включая расчет стоимости обработки воды. Дальнейшая работа в этих направлениях позволит обеспечить обоснованное и эффективное внедрение технологии в практику промышленной водоочистки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Shannon M.A., Bohn P.W., Elimelech M., Georgiadis J.G., Mariñas B.J., Mayes A.M. Science and technology for water purification in the coming decades // *Nature*. 2008. Vol. 452. Issue 7185. Pp. 301–310. DOI: 10.1038/nature06599
2. Cheryan M., Rajagopalan N. Membrane processing of oily streams. Wastewater treatment and waste reduction // *Journal of Membrane Science*. 1998. Vol. 151. Issue 1. Pp. 13–28. DOI: 10.1016/S0376-7388(98)00190-2
3. Perez M., Rodriguez-Cano R., Romero L.I., Sales D. Performance of anaerobic thermophilic fluidized bed in the treatment of cutting-oil wastewater // *Bioresource Technology*. 2007. Vol. 98. Issue 18. Pp. 3456–3463. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.11.005
4. Benito J.M., Cambiella A., Lobo A., Gutiérrez G., Coca J., Pazos C. Formulation, characterization and treatment of metalworking oil-in-water emulsions // *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2010. Vol. 12. Issue 1. Pp. 31–41. DOI: 10.1007/s10098-009-0219-2. EDN WIDIOB.
5. MacAdam J., Ozgencil H., Autin O., Pidou M., Temple C., Parsons S. et al. Incorporating biodegradation and advanced oxidation processes in the treatment of spent metalworking fluids // *Environmental Technology*. 2012. Vol. 33. Issue 24. Pp. 2741–2750. DOI: 10.1080/09593330.2012.678389
6. Benito J., Ríos G., Ortea E., Fernández E., Cambiella A., Pazos C. et al. Design and construction of a modular pilot plant for the treatment of oil-containing wastewaters // *Desalination*. 2002. Vol. 147. Issue 1–3. Pp. 5–10. DOI: 10.1016/S0011-9164(02)00563-5
7. Seo D.C., Lee H.J., Hwang H.N., Park M.R., Kwak N.W., Cho I.J. et al. Treatment of non-biodegradable cutting oil wastewater by ultrasonication-Fenton oxidation process // *Water Science and Technology*. 2007. Vol. 55. Issue 1–2. Pp. 251–259. DOI: 10.2166/wst.2007.009
8. Ali I. New generation adsorbents for water treatment // *Chemical Reviews*. 2012. Vol. 112. Issue 10. Pp. 5073–5091. DOI: 10.1021/cr300133d
9. Liu C., Wu L., Zhang C., Chen W., Luo S. Surface hydrophilic modification of PVDF membranes by trace amounts of tannin and polyethyleneimine // *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 457. Pp. 695–704. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.06.131
10. Kang G., Cao Y. Application and modification of poly(vinylidene fluoride) (PVDF) membranes : a review // *Journal of Membrane Science*. 2014. Vol. 463. Pp. 145–165. DOI: 10.1016/j.memsci.2014.03.055
11. Tanudjaja H.J., Anantharaman A., Ng A.Qi.Qi., Ma Yu., Tanis-Kanbur M.B., Zydney A.L. et al. A review of membrane fouling by proteins in ultrafiltration and microfiltration // *Journal of Water Process Engineering*. 2022. Vol. 50. P. 103294. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103294. EDN SWCSMJ.
12. Lv Y., Du Y., Chen Z.X., Qiu W.Z., Xu Z.K. Nano-composite membranes of polydopamine/electropositive nanoparticles/polyethyleneimine for nanofiltration // *Journal of Membrane Science*. 2018. Vol. 545. Pp. 99–106. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.09.066
13. Zhang N., Jiang B., Zhang L., Huang Z., Sun Y., Zong Y. et al. Low-pressure electroneutral loose nanofiltration membranes with polyphenol-inspired coatings for effective dye/divalent salt separation // *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 359. Pp. 1442–1452. DOI: 10.1016/j.cej.2018.11.033
14. Albo J., Hagiwara H., Yanagishita H., Ito K., Tsuru T. Structural characterization of thin-film polyamide reverse osmosis membranes // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2014. Vol. 53. Issue 4. Pp. 1442–1451. DOI: 10.1021/ie403411w
15. Wu X., Zhao B., Wang L., Zhang Z., Li J., He X. et al. Superhydrophobic PVDF membrane induced by hydrophobic SiO₂ nanoparticles and its use for CO₂ absorption // *Separation and Purification Technology*. 2018. Vol. 190. Pp. 108–116. DOI: 10.1016/j.seppur.2017.07.076
16. Mei X., Liu J., Guo Z., Li P., Bi S., Wang Y. et al. Simultaneous p-nitrophenol and nitrogen removal in PNP wastewater treatment: comparison of two integrated membrane-aerated bioreactor systems // *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 363. Pp. 99–108. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.09.072
17. Anari Z., Sengupta A., Sardari K., Wickramasinghe S.R. Surface modification of PVDF membranes for treating produced waters by direct contact membrane distillation // *Separation and Purification Technology*. 2019. Vol. 224. Pp. 388–396. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.05.032
18. Vijayalekshmi V., Khastgir D. Chitosan/partially sulfonated poly(vinylidene fluoride) blends as polymer electrolyte membranes for direct methanol fuel cell applications // *Cellulose*. 2018. Vol. 25. Issue 1. Pp. 661–681. DOI: 10.1007/s10570-017-1565-6. EDN FNSLLY.
19. Banerjee I., Pangule R.C., Kane R.S. Anti-fouling coatings: recent developments in the design of surfaces that prevent fouling by proteins, bacteria, and marine organisms // *Advanced Materials*. 2011. Vol. 23. Issue 6. Pp. 690–718. DOI: 10.1002/adma.201001215. EDN OERNER.
20. Wang Z.X., Lau C.H., Zhang N.Q., Bai Y.P., Shao L. Mussel-inspired tailoring of membrane wettability for harsh water treatment // *Journal of Materials Chemistry A*. 2015. Vol. 3. Issue 6. Pp. 2650–2657. DOI: 10.1039/C4TA05970K

21. Zhang R., Liu Y., He M., Su Y., Zhao X., Jiang Z. et al. Antifouling membranes for sustainable water purification: strategies and mechanisms // *Chemical Society Reviews*. 2016. Vol. 45. Issue 21. Pp. 5888–5924. DOI: 10.1039/C5CS00579E. EDN XZJGDX.
22. Dizon G.V., Venault A. Direct in-situ modification of PVDF membranes with a zwitterionic copolymer to form bi-continuous and fouling resistant membranes // *Journal of Membrane Science*. 2018. Vol. 550. Pp. 45–58. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.12.065
23. Bengani-Lutz P., Converse E., Cebe P., Asatekin A. Self-assembling zwitterionic copolymers as membrane selective layers with excellent fouling resistance: effect of zwitterion chemistry // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017. Vol. 9. Issue 24. Pp. 20859–20872. DOI: 10.1021/acsami.7b04884
24. Sagle A.C., Ju H., Freeman B.D., Sharma M.M. PEG-based hydrogel membrane coatings // *Polymer*. 2009. Vol. 50. Pp. 756–766. DOI: 10.1016/j.polymer.2008.12.019. EDN KPDJBL.
25. Reis R., Duke M., Orbell J.D., Merenda A., Dumée L.F., Winther-Jensen B. et al. Customizing the surface charge of thin-film composite membranes by surface plasma thin film polymerization // *Journal of Membrane Science*. 2017. Vol. 537. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.05.013. EDN YGTMTM.
26. Ojajuni O., Holder S., Saroj D.P., Cavalli G., Lee J. Rejection of caffeine and carbamazepine by surface-coated PVDF hollow-fiber membrane system // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2016. Vol. 55. Issue 8. Pp. 2417–2425. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b04055. EDN WTSALT.
27. Wang Z., Ji S., He F., Cao M., Peng S., Li Y. One-step transformation of highly hydrophobic membranes into superhydrophilic and underwater superoleophobic ones for high-efficiency separation of oil-in-water emulsions // *Journal of Materials Chemistry A*. 2018. Vol. 6. Issue 8. Pp. 3391–3396. DOI: 10.1039/C7TA10524J
28. Wu W., Huang R., Qi W., Su R., He Z. Bioinspired peptide-coated superhydrophilic poly(vinylidene fluoride) membrane for oil/water emulsion separation // *Langmuir*. 2018. Vol. 34. Issue 22. Pp. 6621–6627. DOI: 10.1021/acs.langmuir.8b01017
29. Zhang W., Zhu Y., Liu X., Wang D., Li J., Jiang L. et al. Salt-Induced Fabrication of Superhydrophilic and Underwater Superoleophobic PAA-g-PVDF Membranes for Effective Separation of Oil-in-Water Emulsions // *Angewandte Chemie International Edition*. 2014. Vol. 53. Issue 3. Pp. 856–860. DOI: 10.1002/anie.201308183
30. Zhu Y., Wang J., Zhang F., Gao S., Wang A., Fang W. et al. Zwitterionic Nanohydrogel Grafted PVDF Membranes with Comprehensive Antifouling Property and Superior Cycle Stability for Oil-in-Water Emulsion Separation // *Advanced Functional Materials*. 2018. Vol. 28. Issue 40. DOI: 10.1002/adfm.201804121
31. Lee H., Dellatore S.M., Miller W.M., Messersmith P.B. Mussel-inspired surface chemistry for multifunctional coatings // *Science*. 2007. Vol. 318. Issue 5849. Pp. 426–430. DOI: 10.1126/science.1147241
32. Sileika T.S., Barrett D.G., Zhang R., Lau K.H.A., Messersmith P.B. Colorless multifunctional coatings inspired by polyphenols found in tea, chocolate, and wine // *Angewandte Chemie International Edition*. 2013. Vol. 52. Issue 41. Pp. 10766–10770. DOI: 10.1002/anie.201304922
33. Barrett D.G., Sileika T.S., Messersmith P.B. Molecular diversity in phenolic and polyphenolic precursors of tannin-inspired nanocoatings // *Chemical Communications*. 2014. Vol. 50. Issue 55. Pp. 7265–7268. DOI: 10.1039/c4cc02961e
34. Bacelo H.A.M., Santos S.C.R., Botelho C.M.S. Tannin-based biosorbents for environmental applications : a review // *Chemical Engineering Journal*. 2016. Vol. 303. Pp. 575–587. DOI: 10.1016/j.cej.2016.06.044. EDN XZDBKR.
35. Ferreira D., Gross G.G., Hagerman A.E., Koldziej H., Yoshida T. Tannins and related polyphenols: perspectives on their chemistry, biology, ecological effects, and human health protection // *Phytochemistry*. 2008. Vol. 69. Issue 18. Pp. 3006–3008. DOI: 10.1016/j.phytochem.2008.10.018
36. Song Y.Z., Kong X., Yin X., Zhang Y., Sun C.C., Yuan J.J. et al. Tannin-inspired superhydrophilic and underwater superoleophobic polypropylene membrane for effective oil/water emulsions separation // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2017. Vol. 522. Pp. 585–592. DOI: 10.1016/j.col-surf.2017.03.023
37. Wang Z., Ji S., Zhang J., He F., Xu Z., Peng S. et al. Dual functional membrane with multiple hierarchical structures (MHS) for simultaneous and high-efficiency removal of dye and nano-sized oil droplets in water under high flux // *Journal of Membrane Science*. 2018. Vol. 564. Pp. 317–327. DOI: 10.1016/j.memsci.2018.07.036
38. Ильиных А.С., Мигалатий Е.В., Корнеев А.В. Разделение водонефтяных эмульсий на поверхностно-модифицированных капиллярных ультрафильтрационных мембранах // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. № 8. С. 1356–1364. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1356-1364. EDN UFHKYJ.
39. Патент RU № 2838923. Способ модификации половолоконных ультрафильтрационных мембран для разделения водных сред / Ильиных А.С., Мигалатий Е.В., Царев Н.С.; патентообл. УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; заявл. № 2024132190 от 28.10.2024; опубл. 23.04.2025.

Поступила в редакцию 18 января 2026 г.

Принята в доработанном виде 11 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 23 апреля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Сергеевич Ильных — ассистент, Институт строительства и архитектуры; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ); 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; as_ilinykh@mail.ru;

Евгений Васильевич Мигалатий — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водного хозяйства и технологии воды, Институт строительства и архитектуры; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ); 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; e.v.migalatiy@urfu.ru.

Вклад авторов:

Ильных А.С. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, участие в разработке учебных программ и их реализации, написание исходного текста, итоговые выводы.

Мигалатий Е.В. — научное руководство, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Shannon M.A., Bohn P.W., Elimelech M., Georgiadis J.G., Mariñas B.J., Mayes A.M. Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*. 2008; 452(7185):301-310. DOI: 10.1038/nature06599
2. Cheryan M., Rajagopalan N. Membrane processing of oily streams. Wastewater treatment and waste reduction. *Journal of Membrane Science*. 1998; 151(1):13-28. DOI: 10.1016/S0376-7388(98)00190-2
3. Perez M., Rodriguez-Cano R., Romero L.I., Sales D. Performance of anaerobic thermophilic fluidized bed in the treatment of cutting-oil wastewater. *Bioresource Technology*. 2007; 98(18):3456-3463. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.11.005
4. Benito J.M., Cambiella A., Lobo A., Gutiérrez G., Coca J., Pazos C. Formulation, characterization and treatment of metalworking oil-in-water emulsions. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2010; 12(1):31-41. DOI: 10.1007/s10098-009-0219-2. EDN WIDIOB.
5. MacAdam J., Ozgencil H., Autin O., Pidou M., Temple C., Parsons S. et al. Incorporating biodegradation and advanced oxidation processes in the treatment of spent metalworking fluids. *Environmental Technology*. 2012; 33(24):2741-2750. DOI: 10.1080/09593330.2012.678389
6. Benito J., Ríos G., Ortea E., Fernández E., Cambiella A., Pazos C. et al. Design and construction of a modular pilot plant for the treatment of oil-containing wastewaters. *Desalination*. 2002; 147(1-3):5-10. DOI: 10.1016/S0011-9164(02)00563-5
7. Seo D.C., Lee H.J., Hwang H.N., Park M.R., Kwak N.W., Cho I.J. et al. Treatment of non-biodegradable cutting oil wastewater by ultrasonication-Fenton oxidation process. *Water Science and Technology*. 2007; 55(1-2):251-259. DOI: 10.2166/wst.2007.009
8. Ali I. New generation adsorbents for water treatment. *Chemical Reviews*. 2012; 112(10):5073-5091. DOI: 10.1021/cr300133d
9. Liu C., Wu L., Zhang C., Chen W., Luo S. Surface hydrophilic modification of PVDF membranes by trace amounts of tannin and polyethyleneimine. *Applied Surface Science*. 2018; 457:695-704. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.06.131
10. Kang G., Cao Y. Application and modification of poly(vinylidene fluoride) (PVDF) membranes : a review. *Journal of Membrane Science*. 2014; 463:145-165. DOI: 10.1016/j.memsci.2014.03.055
11. Tanudjaja H.J., Anantharaman A., Ng A.Qi.Qi., Ma Yu., Tanis-Kanbur M.B., Zydney A.L. et al. A review of membrane fouling by proteins in ultrafiltration and microfiltration. *Journal of Water Process Engineering*. 2022; 50:103294. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103294. EDN SWCSMJ.
12. Lv Y., Du Y., Chen Z.X., Qiu W.Z., Xu Z.K. Nanocomposite membranes of polydopamine/electropositive nanoparticles/polyethyleneimine for nanofiltration. *Journal of Membrane Science*. 2018; 545:99-106. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.09.066
13. Zhang N., Jiang B., Zhang L., Huang Z., Sun Y., Zong Y. et al. Low-pressure electroneutral loose nanofiltration membranes with polyphenol-inspired coatings for effective dye/divalent salt separation. *Chemical Engineering Journal*. 2019; 359:1442-1452. DOI: 10.1016/j.cej.2018.11.033
14. Albo J., Hagiwara H., Yanagishita H., Ito K., Tsuru T. Structural characterization of thin-film polyamide reverse osmosis membranes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2014; 53(4):1442-1451. DOI: 10.1021/ie403411w
15. Wu X., Zhao B., Wang L., Zhang Z., Li J., He X. et al. Superhydrophobic PVDF membrane induced by hydrophobic SiO₂ nanoparticles and its use for CO₂ absorption. *Separation and Purification Technology*. 2018; 190:108-116. DOI: 10.1016/j.seppur.2017.07.076

16. Mei X., Liu J., Guo Z., Li P., Bi S., Wang Y. et al. Simultaneous p-nitrophenol and nitrogen removal in PNP wastewater treatment: comparison of two integrated membrane-aerated bioreactor systems. *Journal of Hazardous Materials*. 2019; 363:99-108. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.09.072
17. Anari Z., Sengupta A., Sardari K., Wickramasinghe S.R. Surface modification of PVDF membranes for treating produced waters by direct contact membrane distillation. *Separation and Purification Technology*. 2019; 224:388-396. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.05.032
18. Vijayalekshmi V., Khastgir D. Chitosan/partially sulfonated poly(vinylidene fluoride) blends as polymer electrolyte membranes for direct methanol fuel cell applications. *Cellulose*. 2018; 25(1):661-681. DOI: 10.1007/s10570-017-1565-6. EDN FNSLLY.
19. Banerjee I., Pangule R.C., Kane R.S. Antifouling coatings: recent developments in the design of surfaces that prevent fouling by proteins, bacteria, and marine organisms. *Advanced Materials*. 2011; 23(6):690-718. DOI: 10.1002/adma.201001215. EDN OERNER.
20. Wang Z.X., Lau C.H., Zhang N.Q., Bai Y.P., Shao L. Mussel-inspired tailoring of membrane wettability for harsh water treatment. *Journal of Materials Chemistry A*. 2015; 3(6):2650-2657. DOI: 10.1039/C4TA05970K
21. Zhang R., Liu Y., He M., Su Y., Zhao X., Jiang Z. et al. Antifouling membranes for sustainable water purification: strategies and mechanisms. *Chemical Society Reviews*. 2016; 45(21):5888-5924. DOI: 10.1039/C5CS00579E. EDN XZJGDX.
22. Dizon G.V., Venault A. Direct in-situ modification of PVDF membranes with a zwitterionic copolymer to form bi-continuous and fouling resistant membranes. *Journal of Membrane Science*. 2018; 550:45-58. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.12.065
23. Bengani-Lutz P., Converse E., Cebe P., Asatekin A. Self-assembling zwitterionic copolymers as membrane selective layers with excellent fouling resistance: effect of zwitterion chemistry. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017; 9(24):20859-20872. DOI: 10.1021/acsami.7b04884
24. Sagle A.C., Ju H., Freeman B.D., Sharma M.M. PEG-based hydrogel membrane coatings. *Polymer*. 2009; 50:756-766. DOI: 10.1016/j.polymer.2008.12.019. EDN KPDJBL.
25. Reis R., Duke M., Orbell J.D., Merenda A., Dumée L.F., Winther-Jensen B. et al. Customizing the surface charge of thin-film composite membranes by surface plasma thin film polymerization. *Journal of Membrane Science*. 2017; 537:1-10. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.05.013. EDN YGTMTH.
26. Ojajuni O., Holder S., Saroj D.P., Cavalli G., Lee J. Rejection of caffeine and carbamazepine by surface-coated PVDF hollow-fiber membrane system. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2016; 55(8):2417-2425. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b04055. EDN WTSALT.
27. Wang Z., Ji S., He F., Cao M., Peng S., Li Y. One-step transformation of highly hydrophobic membranes into superhydrophilic and underwater superoleophobic ones for high-efficiency separation of oil-in-water emulsions. *Journal of Materials Chemistry A*. 2018; 6(8):3391-3396. DOI: 10.1039/C7TA10524J
28. Wu W., Huang R., Qi W., Su R., He Z. Bioinspired peptide-coated superhydrophilic poly(vinylidene fluoride) membrane for oil/water emulsion separation. *Langmuir*. 2018; 34(22):6621-6627. DOI: 10.1021/acs.langmuir.8b01017
29. Zhang W., Zhu Y., Liu X., Wang D., Li J., Jiang L. et al. Salt-Induced Fabrication of Superhydrophilic and Underwater Superoleophobic PAA-g-PVDF Membranes for Effective Separation of Oil-in-Water Emulsions. *Angewandte Chemie International Edition*. 2014; 53(3):856-860. DOI: 10.1002/anie.201308183
30. Zhu Y., Wang J., Zhang F., Gao S., Wang A., Fang W. et al. Zwitterionic Nanohydrogel Grafted PVDF Membranes with Comprehensive Antifouling Property and Superior Cycle Stability for Oil-in-Water Emulsion Separation. *Advanced Functional Materials*. 2018; 28(40). DOI: 10.1002/adfm.201804121
31. Lee H., Dellatore S.M., Miller W.M., Messersmith P.B. Mussel-inspired surface chemistry for multifunctional coatings. *Science*. 2007; 318(5849):426-430. DOI: 10.1126/science.1147241
32. Sileika T.S., Barrett D.G., Zhang R., Lau K.H.A., Messersmith P.B. Colorless multifunctional coatings inspired by polyphenols found in tea, chocolate, and wine. *Angewandte Chemie International Edition*. 2013; 52(41):10766-10770. DOI: 10.1002/anie.201304922
33. Barrett D.G., Sileika T.S., Messersmith P.B. Molecular diversity in phenolic and polyphenolic precursors of tannin-inspired nanocoatings. *Chemical Communications*. 2014; 50(55):7265-7268. DOI: 10.1039/c4cc02961e
34. Bacao H.A.M., Santos S.C.R., Botelho C.M.S. Tannin-based biosorbents for environmental applications : a review. *Chemical Engineering Journal*. 2016; 303:575-587. DOI: 10.1016/j.cej.2016.06.044. EDN XZDBKR.
35. Ferreira D., Gross G.G., Hagerman A.E., Koldziej H., Yoshida T. Tannins and related polyphenols: perspectives on their chemistry, biology, ecological effects, and human health protection. *Phytochemistry*. 2008; 69(18):3006-3008. DOI: 10.1016/j.phytochem.2008.10.018
36. Song Y.Z., Kong X., Yin X., Zhang Y., Sun C.C., Yuan J.J. et al. Tannin-inspired superhydrophilic and underwater superoleophobic polypropylene membrane for effective oil/water emulsions separation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2017; 522:585-592. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2017.03.023

37. Wang Z., Ji S., Zhang J., He F., Xu Z., Peng S. et al. Dual functional membrane with multiple hierarchical structures (MHS) for simultaneous and high-efficiency removal of dye and nano-sized oil droplets in water under high flux. *Journal of Membrane Science*. 2018; 564:317-327. DOI: 10.1016/j.memsci.2018.07.036

38. Ilyinykh A.S., Migalatiy E.V., Korneev A.V. Oil-water emulsion separation on surface-modified capillary ultrafiltration membranes. *Vestnik MGSU*

[Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1356-1364. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1356-1364. EDN UFHKYJ. (rus.).

39. Patent RU No. 2838923. *Method of modifying hollow fibre ultrafiltration membranes for separating aqueous media* / Ilyinykh A.S., Migalatiy E.V., Tsarev N.S.; patent holder Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; appl. No. 2024132190 10/28/2024; publ. 04/23/2025.

Received January 18, 2026.

Adopted in revised form on February 11, 2026.

Approved for publication on April 23, 2026.

B I O N O T E S: **Alexander S. Ilyinykh** — assistant, Institute of Construction and Architecture; **Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU)**; 19 Mira st., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation; as_ilyinykh@mail.ru;

Evgeny V. Migalatiy — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Water Management and Water Technology, Institute of Construction and Architecture; **Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU)**; 19 Mira st., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation; e.v.migalatiy@urfu.ru.

Authors' contributions:

Alexander S. Ilyinykh — scientific guidance, research concept, development of methodology, participation in curriculum development and implementation, writing the original text, final conclusions.

Evgeny V. Migalatiy — scientific guidance, finalization of the text, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

Переходные процессы изменения температуры и скорости потока при ступенчатом количественном регулировании в системе «нагреватель – вентилятор – помещение»

Рустам Шамильевич Мансуров

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин);
г. Новосибирск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Наиболее перспективной из быстроразвивающихся энергосберегающих технологий, используемой в системах жизнеобеспечения, является регулирование производительности вентиляционной установки в зависимости от качества внутреннего воздуха в обслуживаемых помещениях. В процессе регулирования происходят переходные процессы, сопровождающиеся колебаниями параметров воздуха в помещении. Изучение закономерностей развития переходных процессов в потоке воздуха необходимо для конструирования энергоэффективных элементов климатических систем, разработки адаптивных алгоритмов управления микроклиматом. Представлены и проанализированы экспериментальные данные об изменениях параметров воздушного потока и теплоты в системе «воздухо-нагреватель – вентилятор – помещение» при ступенчато-последовательном регулировании производительности вентилятора.

Материалы и методы. Метод изучения процесса теплообмена между воздухом, климатической установкой и обслуживаемым помещением основан на натурном эксперименте, осуществленном в реально эксплуатируемом здании. Параметры воздушного потока в исследуемой системе регистрировались как для системы с сосредоточенными параметрами.

Результаты. При различных временных интервалах между скачками изменения производительности вентилятора и для разных режимов работы воздухонагревателя экспериментально исследованы переходные процессы изменения параметров воздушного потока.

Выводы. Минимальная продолжительность переходного процесса изменений параметров воздушного потока, проходящего через климатическую установку, достигается при некоторой оптимальной величине временного интервала между скачками производительности вентилятора.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вентилятор, воздухонагреватель, регулирование, переходный процесс, скачок производительности, климатическая установка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мансуров Р.Ш. Переходные процессы изменения температуры и скорости потока при ступенчатом количественном регулировании в системе «нагреватель – вентилятор – помещение» // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 7. С. 1194–1209. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1194-1209

Автор, ответственный за переписку: Рустам Шамильевич Мансуров, rmansurov@inbox.ru.

Transient processes of temperature and flow velocity changes with stepwise quantitative control in the “heater – fan – room system”

Rustam Sh. Mansurov

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin); Novosibirsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The most promising of the rapidly developing energy-saving technologies used in life support systems is the regulation of ventilation system performance depending on the indoor air quality in the serviced rooms. In the process of regulation, transients occur, accompanied by fluctuations in indoor air parameters. The study of the patterns of development of transient processes in the air flow is necessary for the design of energy-efficient elements of climate systems, the development of adaptive algorithms for climate control. Experimental data on changes in the parameters of air flow and heat in the “heater – fan – room” system with stepwise sequential control of fan performance are presented and analyzed.

Materials and methods. The method of studying the process of heat exchange between air, a climate control system and a serviced room is based on a field experiment carried out in a building in actual operation. The air flow parameters in the system under study were recorded as for a system with concentrated parameters.

Results. At different time intervals between step changes in fan performance and for different modes of operation of the air heater, transient processes of changing air flow parameters have been experimentally investigated and studied.

Conclusions. The minimum duration of the transient process of changes in the parameters of the air flow passing through the climate control unit is achieved with a certain optimal value of the time interval between fan performance spikes.

KEYWORDS: fan, air heater, regulation, transient process, performance surge, climate control system

FOR CITATION: Mansurov R.Sh. Transient processes of temperature and flow velocity changes with stepwise quantitative control in the “heater – fan – room” system. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(7):1194-1209. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1194-1209 (rus.).

Corresponding author: Rustam Sh. Mansurov, rmansurov@inbox.ru.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием систем управления технологическими процессами, основанными на использовании частотного регулирования скоростью вращения асинхронных электродвигателей [1–3], применении ЕС-двигателей [4, 5] и программируемых логических контроллеров, появилась возможность автоматизированного количественного регулирования в динамике. Количественное регулирование позволяет получить ключевой положительный эффект — минимизировать эксплуатационные затраты на энергоносители и материальные ресурсы, например изменение количества приточного воздуха в зависимости от концентрации вредных веществ в обслуживаемом помещении (газов, теплоты, влаги, пыли), режима работы вентиляции в производственных помещениях и помещениях гражданских зданий, изменение в допустимых пределах расхода теплохладоносителя при переменной технологической нагрузке теплообменного оборудования [6–8] и расходе воды на хозяйственно-бытовые нужды [9, 10]. Однако количественное регулирование имеет ряд значительных недостатков: в системах климатизации это аэродинамическая разрегулировка вентиляционных сетей [11]; существенное отклонение аэродинамических характеристик вентилляторов в динамике от паспортных [12, 13]; снижение эффективности воздухораспределения и образование застойных зон в рабочем пространстве обслуживаемых помещений [14]; в системах тепло-, водо- и холодоснабжения — гидравлическая разрегулировка в кольцевых и тупиковых сетях [15–18], связанная с непропорциональным изменением расходов у потребителей при изменении общего расхода на источнике, и наоборот, изменение расходов у некоторой части потребителей ведет к изменению расходов на источнике и у другой части потребителей общей сети [19–21].

В системах вентиляции и кондиционирования воздуха необходимость изменения воздухообмена или полного его прекращения в части обслуживаемых помещений по причинам, описанным выше, например, за счет дросселирования, приводит к аэродинамической разрегулировке вентиляционной сети. В таких случаях требуется поддерживать постоянный перепад давления на вентиляционной установке [22–25] при обеспечении максимально возможной аэродинамической устойчивости вентиляционной сети [26]. При варьировании воздухообмена в обслуживаемом помещении меняется расход приточного воздуха через воздухораспределители, что нарушает расчетную схему движения воздушных потоков (из-

меняются число Ar , дальнобойность и форма струи), ухудшая качество микроклимата в рабочем пространстве помещения и образование застойных зон. В таких случаях следует предусмотреть возможность управляемого отключения или включения части воздухораспределительных устройств пропорционально изменению расхода приточного воздуха или использовать активные воздухораспределители, регулируемые по параметрам воздуха в рабочей зоне [27–29]. Для систем тепло-, холодо- и водоснабжения для стабилизации гидравлического режима на стороне потребителя применяют дросселирующие устройства для поддержания постоянного перепада давления или расхода на вводе [30, 31]. На протяженных сетях тепло-, холодо- и водоснабжения со сложным рельефом местности устанавливают повысительные или понизительные насосные станции, дросселирующие устройства для поддержания необходимого пьезометрического графика давлений [32, 33]. В последние десятилетия из-за возникновения гидравлической разрегулировки в сетях теплоснабжения при переходе на автоматизированные индивидуальные тепловые пункты у потребителей намечается тенденция практического применения автоматического управления производительностью насосного оборудования на источнике теплоснабжения с частотно-регулируемым приводом.

Следовательно, количественное регулирование, помимо положительного экономического эффекта, создает серьезные проблемы, решение которых должно осуществляться как при расчете, в первую очередь, гидравлических (аэродинамических) динамических режимов работы системы, при подборе оборудования (нагнетателей, частотных регуляторов, управляемых дросселирующих устройств), так и при разработке алгоритмов управления. Кроме основных проблем, обозначенных авторами в вышеприведенных публикациях, имеются и те, которые возникают во время количественного регулирования, связанные с изменением интенсивности тепло-массообменных процессов в оборудовании систем теплоснабжения и вентиляции, со стохастическим характером перераспределения потоков между потребителями: зданиями, помещениями, воздухораспределителями и т.п. Такие процессы могут привести к появлению положительной обратной связи между источником ресурса (воды, воздуха, пара, теплоты, холода) и его потребителями, что, в свою очередь, ведет к перерегулированию, незатухающим колебаниям параметров потока (в худшем случае — к резонансу, помпажу и гидроудару) в гидравлической/аэродина-

мической сети в целом и у конечного потребителя в частности. Поэтому важно при количественном регулировании как на источнике, так и у потребителей согласовано изменять расход ресурса за наикратчайшее время при минимальном перерегулировании его параметров с учетом гидравлической, тепловой устойчивости и инерционности системы. Учитывая при этом: протяженность сети; сжимаемость потока (в случае гидроудара); скорость изменения производительности нагнетателей; изменения интенсивности процессов теплообмена в смесительных и теплообменных устройствах; быстроты закрытия-открытия дросселирующих устройств, теплоаккумулирующих свойств материалов оборудования и строительных конструкций и т.п.

Цель исследования — изучение возможности сокращения времени переходных процессов, уменьшения перерегулирования при изменении производительности вентилятора.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования выполнялись на натурной установке, детально описанной в предшествующих работах автора. На рис. 1 показана принципиальная схема исследовательской установки, информационно-измерительная система со схемой движения потоков теплоты.

На рис. 2 представлена режимная карта работы воздухонагревателя и вентилятора в графическом виде. Теплопроизводительность электрического воздухонагревателя регулировалась симисторным регулятором АW. Теплопроизводительность воздухонагревателя постоянна и составляла в долях от его па-

спортной мощности ($W_{\max} = 12 \text{ кВт}$), соответственно для I режима $\bar{W} = 0,3$, а для II режима $\bar{W} = 0,6$. Расход подаваемого воздуха отображен в долях от максимальной частоты электрического тока ($F_{\max} = 70 \text{ Гц}$) и регулировался частотным преобразователем АF. Переходный процесс запускался изменением производительности вентилятора скачкообразным управляющим сигналом АF при начальной производительности $\bar{F} = 0,5$. Первый скачок составлял $+0,3 (+21 \text{ Гц})$, после которого второй с определенной задержкой во времени $-0,2 (-14 \text{ Гц})$. Автоматическая регистрация параметров воздушного потока велась до момента стабилизации температуры.

Эксперименты делились на серии. Исследовались два режима работы воздухонагревателя и три интервала между изменениями расхода воздуха (100, 50 и 25 с). Всего выполнено 6 серий по 54 единичных эксперимента.

Параметры потока (температура и скорость) регистрировались через одну секунду. Продолжительность переходного процесса после второго скачка не превышала 500 с, что установлено в постановочных экспериментах. Время запаздывания изменения параметров воздуха после изменения производительности вентилятора определяет минимальное время между первым и вторым скачками. Сокращение этого периода менее 12 с ведет к слиянию воздействия на поток от двух скачков к эффекту от единичного скачка. Таким образом, три временных интервала в 25, 50 и 100 с были приняты между первым и вторым скачками. Для возврата к начальной производительности $\bar{F} = 0,5$ после второго скачка через 500 с производился третий скачок $-0,1$. После чего эксперимент повторялся.

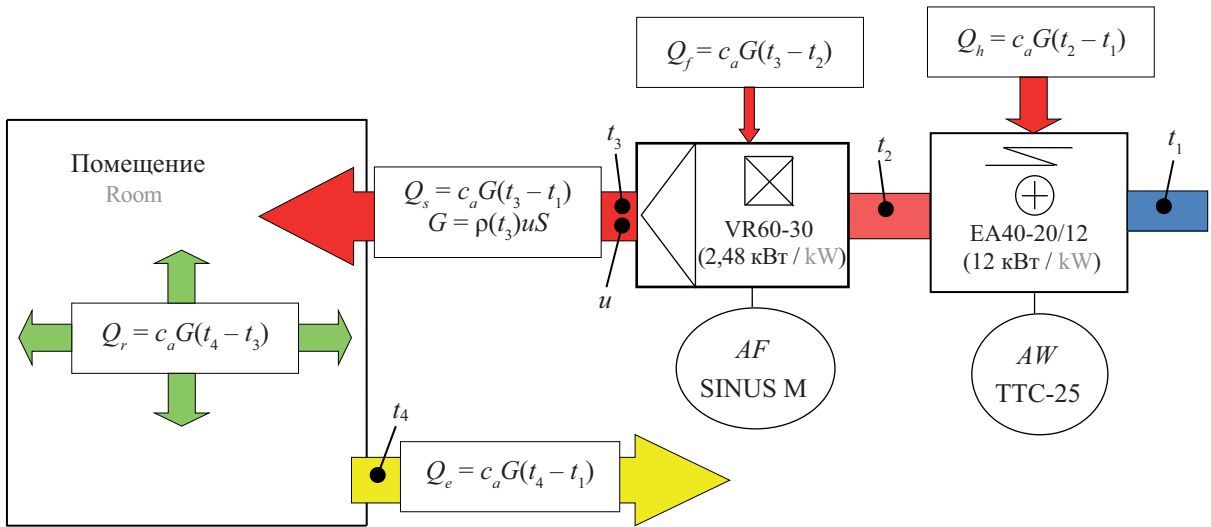


Рис. 1. Принципиальная схема информационно-измерительной системы со схемой движения потоков теплоты: Q — теплота, Дж; c_a — теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); G — массовый расход воздуха, кг/с; t — температура, °C; u — скорость воздуха, м/с; S — площадь сечения воздуховода, м²; ρ — плотность воздуха, кг/м³

Fig. 1. Schematic diagram of a research facility, information and measuring system with a diagram of the movement of heat flows: Q — heat, J; c_a — heat capacity of air, J/(kg·K); G — mass air flow rate, kg/s; t — temperature, °C; u — air velocity, m/s; S — duct cross-sectional area, m²; ρ — air density, kg/m³

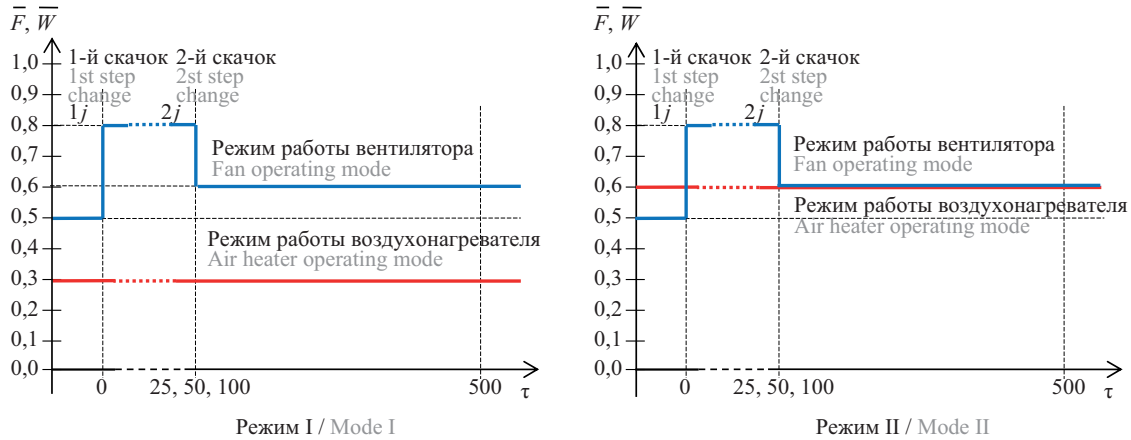


Рис. 2. Режимы работы воздушонагревателя: I режим $\bar{W} = 0,3$; II режим $\bar{W} = 0,6$ (красный); вентилятора (синий)

Fig. 2. Operating modes air heater: I mode $\bar{W} = 0,3$; II mode $\bar{W} = 0,6$ (red); fan (blue)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим сначала процессы изменения скорости воздуха u и температур t_1, t_2, t_3, t_4 , заметим, что температура наружного воздуха t_1 в течение времени конкретного единичного эксперимента оставалась практически постоянной. Динамика этих параметров показана на рис. 3.

По завершении переходного процесса после двух последовательных скачков $\bar{F} = +0,3$ и $-0,2$ с результирующим увеличением производительности

вентилятора на $\bar{F} = +0,1$ температура t_4 снижается. Перед первым скачком для II режима она ниже t_3 и выше нее для I режима, что определяется тепловым балансом помещения. Условиям проведения экспериментов второму режиму соответствовала более высокая температура наружного воздуха при большей теплопроизводительности воздушонагревателя, чем для первого режима, что привело к более высоким значениям температур t_2 и t_3 , чем t_4 .

Рост частоты вращения рабочего колеса вентилятора происходит в течение 3 с после первого

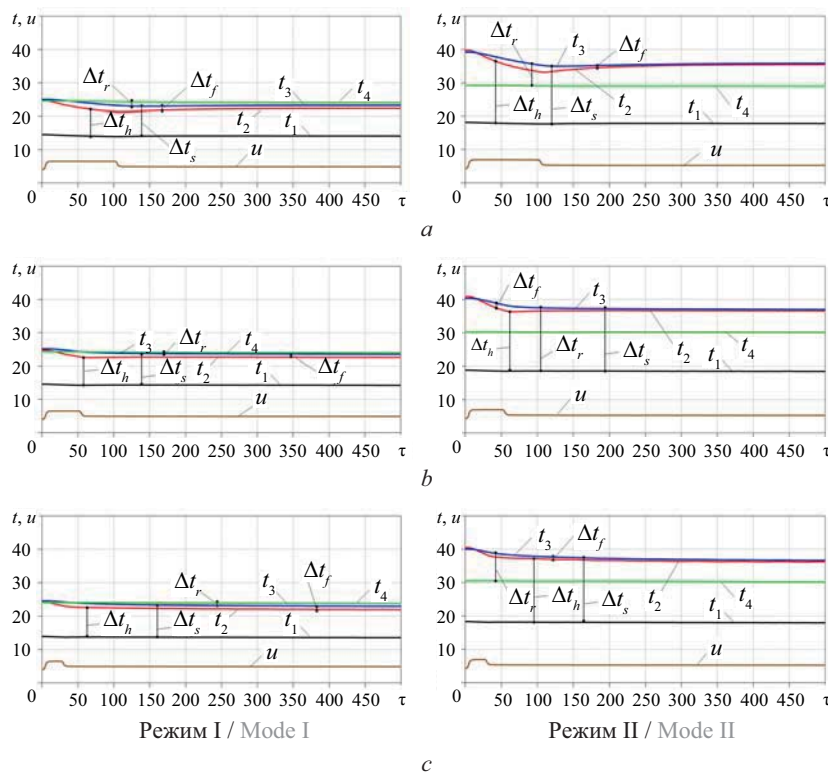


Рис. 3. Переходные процессы изменения температуры и скорости воздуха: а — интервал 100 с; б — интервал 50 с; с — интервал 25 с

Fig. 3. Transient processes of air temperature and velocity changes: a — interval 100 s; b — interval 50 s; c — interval 25 s

скачка, а изменения скорости воздуха u наблюдаются только спустя 5–6 с. Продолжительность разгона потока воздуха составляет $\approx 7\text{--}8$ с. Следовательно, увеличение скорости u потока по отношению к увеличению частоты вращения рабочего колеса является инерционным процессом и зависит, на взгляд автора, в основном от аэродинамической характеристики сопротивления вентиляционной сети k , и чем она выше, тем продолжительнее будет отставание изменения скорости потока от изменения частоты вращения рабочего колеса нагнетателя. То есть при разгоне сопротивление вентиляционной сети будет возрастать, что будет замедлять рост скорости потока. При замедлении в течение $\approx 11\text{--}12$ с наблюдается обратный процесс — поток воздуха будет снижать свою скорость u медленнее, чем при разгоне за счет замедляющегося по инерции ротора электродвигателя с рабочим колесом, причем аэродинамическое сопротивление сети снижается, что также способствует замедлению снижения скорости потока u .

В табл. 1 приведены усредненные значения изменения скорости потока воздуха u для обоих режимов работы воздухонагревателя при разгоне и замедлении.

Из табл. 1 видно, что замедление скорости потока u происходит более чем в два раза медленнее, чем при его разгоне. Этот факт можно также наблюдать и на рис. 3, кривая замедления u более пологая, чем разгона. Потери давления ΔP , Па, и аэродинамическая характеристика сопротивления k , Па $\cdot 10^4/(\text{м}^3/\text{ч})^2$, сети в установившемся режиме сведены в табл. 2.

Непостоянство аэродинамической характеристики сопротивления сети, а именно ее уменьшение с увеличением производительности вентилятора для обоих режимов работы воздухонагревателя, указывает

на то, что в системе имеется элемент, не подчиняющийся квадратичной зависимости потерь давления от расхода. Этот элемент — карманный фильтр, режим течения через который не является развитым турбулентным, а скорее переходным или даже ламинарным. Следовательно, для фильтра потери давления не будут определяться квадратичной зависимостью, а зависимостью вида $\Delta P = kL^n$ с показателем степени n в диапазоне от 1 до 2. Поэтому при увеличении производительности вентилятора аэродинамическая характеристика сопротивления k уменьшается, так как фильтр дает меньший прирост потерь давления, чем вся остальная сеть.

С увеличением скорости потока u после первого скачка при постоянном режиме работы воздухонагревателя температура t_2 снижается и соответственно уменьшается $\Delta t_h = t_2 - t_1$, причем уменьшение t_2 непропорционально увеличению u , а происходит с замедлением. Замедление скорости снижения t_2 служит следствием увеличения теплосъема с теплообменной поверхности воздухонагревателя при постоянном электропотреблении воздухонагревателя. После второго скачка изменения производительности вентилятора скорость потока u снижается, соответственно увеличивается Δt_h при снижении теплосъема, что замедляет теперь скорость роста t_2 . Скорость и продолжительность переходного процесса уменьшения или увеличения температуры t_2 зависят как от интенсивности теплосъема, так и от теплоинерционных свойств тепловыделяющих элементов. По завершении переходного процесса после каждого одиночного скачка производительности вентилятора соотношение тепловыделений от воздухонагревателя до и после скачка остается практически неизменным

Табл. 1. Усредненные значения изменения скорости потока воздуха, (м/с)/с

Интервал, с Interval, s	Режим I / Mode I		Режим II / Mode II	
	Разгон Acceleration	Замедление Deceleration	Разгон Acceleration	Замедление Deceleration
100	0,29	−0,13	0,31	−0,11
50	0,33	−0,14	0,36	−0,14
25	0,33	−0,14	0,35	−0,14

Табл. 2. Потери давления сети ΔP , Па, и аэродинамическая характеристика сопротивления сети k , Па $\cdot 10^4/(\text{м}^3/\text{ч})^2$, в установившемся режиме при различных производительностях вентилятора

Table 2. Network pressure losses ΔP , Pa, and aerodynamic characteristics of network resistance k , Pa $\cdot 10^4/(\text{m}^3/\text{h})^2$, in steady state at different fan capacities

Интервал, с Interval, s	Режим I / Mode I						Режим II / Mode II					
	$\bar{F} = 0,5$		$\bar{F} = 0,6$		$\bar{F} = 0,8$		$\bar{F} = 0,5$		$\bar{F} = 0,6$		$\bar{F} = 0,8$	
	ΔP	k	ΔP	k	ΔP	k	ΔP	k	ΔP	k	ΔP	k
100	290	2,13	408	2,07	690	1,98	281	1,82	395	1,73	664	1,67
50	289	2,11	407	2,05	689	1,97	282	1,81	395	1,70	662	1,65
25	290	2,13	407	2,05	688	1,98	283	1,82	396	1,70	662	1,66

(только для I режима (см. табл. 4), будет подробно описано далее).

На изменение температуры t_3 влияют несколько взаимозависимых изменяющихся параметров: t_2 после воздухонагревателя; температурный напор между воздушным потоком и электродвигателем канального вентилятора; тепловыделения вентилятора; тепловая инерция электродвигателя и рабочего колеса вентилятора. Следовательно, при увеличении производительности вентилятора температура t_3 на всем протяжении переходного процесса разгона всегда выше t_2 , так как t_2 уменьшается, а снижение t_3 замедляется. Замедление t_3 происходит из-за: увеличения тепловыделений вентилятора на повышение частоты вращения; роста теплосъема между электродвигателем и снижающейся температурой t_2 ; теплоинерционных свойств конструктивных элементов электродвигателя вентилятора, замедляющих скорость роста теплоотдачи в поток, увеличивая тем самым продолжительность переходного процесса разгона. Таким образом, снижение температуры t_3 определяется теплообменным процессом охлаждения конструктивных элементов электродвигателя вентилятора воздушным потоком при снижающейся температуре t_2 и замедляется процессами, стремящимися увеличить разность температур Δt_f : отдачи части ранее аккумулярованной теплоты в поток конструктивными элементами электродвигателя и увеличением тепловыделений от электродвигателя за счет повышения частоты вращения. Эффект от влияния всех перечисленных факторов на t_3 можно наблюдать на рис. 4 от момента первого скачка при $\tau = 0$ до момента второго скачка с различными интервалами между ними. При снижении производительности вентилятора отмечается обратный эффект, t_2 увеличивается, а рост t_3

существенно замедляется из-за следующих причин: при снижении частоты вращения уменьшаются тепловыделения электродвигателя вентилятора в поток перемещаемого воздуха; от повышения температуры t_2 уменьшается температурный напор между потоком и конструктивными элементами электродвигателя вентилятора, что снижает теплосъем с их поверхности; из-за аккумуляирования части теплоты из потока конструктивными элементами в результате возрастает продолжительность переходного процесса замедления. Таким образом, процесс повышения t_3 определяется процессом нагрева конструктивных элементов электродвигателя вентилятора потоком с растущей температурой t_2 и замедляется процессами, стремящимися уменьшить разность температур Δt_f : процессом уменьшения тепловыделений из-за снижения частоты вращения и процессом поглощения части теплоты из потока конструктивными элементами электродвигателя. Однако незначительное снижение производительности вентилятора имеет нюансы. Суть их заключается в следующем: при небольшом снижении производительности вентилятора $\bar{F} = 0,6 \rightarrow 0,5$ (после третьего скачка) и при малой теплопроизводительности воздухонагревателя $\bar{W} = 0,3$ (I режим) температура t_2 в течение всего переходного процесса от $\tau = 550$ до $\tau = 1050$ с не превышает температуру t_3 (рис. 4). А при $\bar{W} = 0,6$ (II режим) температура t_3 в течение последних 500 с из 1050 так и не превысила температуру t_2 , что свидетельствует о недостаточности времени на завершение переходного процесса замедления для данного режима работы воздухонагревателя.

Разность температур $\Delta t_f = t_3 - t_2$ на этом временном отрезке отрицательна и достигает своего максимума, равного $-0,73$ °C на ≈ 750 с, а к концу проведе-

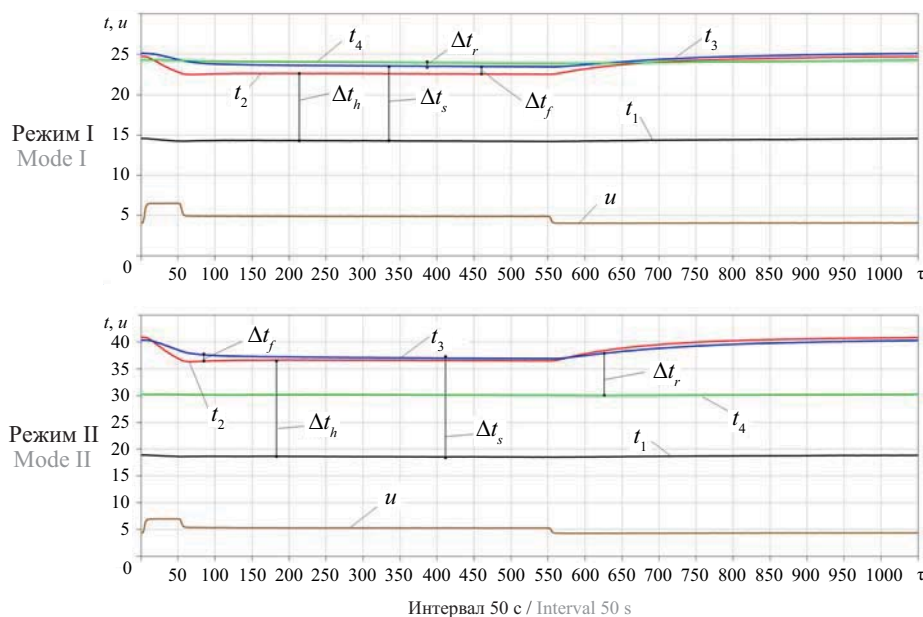


Рис. 4. Изменения температур t_1 , t_2 , t_3 , t_4 и скорости воздуха u для интервала между скачками продолжительностью 50 с
Fig. 4. Transients of temperature changes t_1 , t_2 , t_3 , t_4 and flow velocity u for the interval between step changes of 50 s

Введем параметр $\Delta Q_f / \Delta Q_h$, физический смысл которого заключается в динамике изменения отношения разности тепловыделений от вентилятора к разности тепловыделений от воздухонагревателя в зависимости от временного интервала между скачками производительности вентилятора. Разность определена между тепловыделениями элемента после скачка и перед скачком. Продолжительность переходных процессов при скачке $0,5 \rightarrow 0,8$ составляет 25, 50 и 100 с, для скачков $0,8 \rightarrow 0,6$ и $0,6 \rightarrow 0,5$ по 500 с. Данные о динамике приведены в табл. 3, там же для сравнения приведены значения $\Delta Q / \Delta Q_h$ от оди-

При замедлении потока ($0,8 \rightarrow 0,6$) приращения тепловыделений ΔQ_f уменьшаются, а приращения ΔQ_h растут с увеличением времени между скачками.

Table 3. Time variation in the ratio of the difference between heat outputs after and before the fan step change to the difference in heat output from the air heater

Интервал, с / Interval, s	Режим I / Mode I						Режим II / Mode II																																																	
	$\bar{F}$																																																							
	0,5 → 0,8			0,8 → 0,6			0,6 → 0,5			0,5 → 0,8			0,8 → 0,6			0,6 → 0,5																																								
	От одиночных скачков From individual step changes			От одиночных скачков From individual step changes			От одиночных скачков From individual step changes			От одиночных скачков From individual step changes			От одиночных скачков From individual step changes			От одиночных скачков From individual step changes																																								
25	+504	+760	+1876	+1190	0,23	0,41	0,81	0,43	–188	–451	–671	–2110	–1852	–1132	0,09	0,24	0,59	0,33	–316	–309	–289	–116	–94	–58	2,73	3,27	4,96	3,31	+751	+1201	+4198	+2847	0,15	0,29	0,52	0,21	–280	–766	–1044	–4520	–3956	–2794	0,06	0,19	0,37	0,12	–470	–435	–432	–452	–242	–237	1,04	1,80	1,82	0,31

Исходя из этого, сокращение временного интервала (менее времени стабилизации переходного процесса от одиночного скачка) между двумя любыми скачками, в нашем случае это $0,5 \rightarrow 0,8$ и $0,8 \rightarrow 0,6$, снижает влияние переходного процесса от первого скачка на переходные процессы, инициированные последующими скачками. Следовательно, изменения тепловыделений ΔQ_f и ΔQ_h при замедлении ($0,8 \rightarrow 0,6$ и $0,6 \rightarrow 0,5$) после незавершенного переходного процесса разгона ($0,5 \rightarrow 0,8$) стабилизируются быстрее из-за недостаточности времени для прогрессирующего развития переходного процесса после первого скачка, приближаясь к установившемуся состоянию при минимальных временных интервалах следующими друг за другом скачками. Сравнение соотношений $\Delta Q_f / \Delta Q_h$ с соотношением от одиночных скачков указывает на то, что сокращение времени между скачками приводит к скорейшей стабилизации переходных процессов $0,8 \rightarrow 0,6$ и $0,6 \rightarrow 0,5$ (только для I режима) даже в сравнении с одиночными скачками. Соотношение $\Delta Q_f / \Delta Q_h$ для переходного процесса $0,6 \rightarrow 0,5$ (II режим), что после одиночного скачка, что после предшествующих скачков $0,5 \rightarrow 0,8$ и $0,8 \rightarrow 0,6$, находится на прогрессирующей стадии, т.е. переходный процесс $0,6 \rightarrow 0,5$ незавершен. Исходя из этого, необходимо избегать малых изменений производительности вентилятора при относительно значительной теплопроизводительности воздухонагревателя, т.е. придерживаться в таких случаях максимального соотношения $\Delta Q_f / \Delta Q_h$, добиваясь тем самым минимальной продолжительности переходного процесса.

Таким образом, по окончании переходного процесса изменения производительности канального вентилятора приводят к изменению его тепловыделений ΔQ_f в поток воздуха, т.е. к увеличению при повышении частоты вращения рабочего колеса или к уменьшению — при снижении частоты вращения. Изменение тепловыделений от воздухонагревателя ΔQ_n , в нашем случае воздухонагревателя, происходит только во время переходного процесса, а по окончании его возвращается к прежнему уровню тепловыделений, что вполне очевидно при его неизменном режиме электропотребления. Для жидкостных воздухонагревателей при изменении производительности вентилятора при постоянной температуре входящего теплоносителя и его расходе количество теплоты, выделяемой в поток или поглощаемой из потока, не останется постоянным из-за изменения интенсивности теплоотдачи с поверхности теплообменника, влияющей на изменение температуры теплоносителя на выходе из воздухонагревателя.

Рассмотрим изменения соотношений абсолютных тепловыделений от воздушнонагревателя и вентилятора после скачка к тепловыделениям перед скачком (табл. 4).

При разгоне ($0,5 \rightarrow 0,8$) процесс изменения температуры t_2 , как было ранее отмечено, незавершен и тепловыделения от воздухонагревателя для I и II режимов работы за счет увеличения скорости потока увеличиваются. При этом они снижаются с увеличением времени между скачками из-за уменьшения отношения разностей температур $\Delta t_h^{0,8}/\Delta t_h^{0,5}$. При сравнении соотношения $\Delta t_h^{0,8}/\Delta t_h^{0,5}$ от двух последовательных

Табл. 4. Изменения соотношений абсолютных тепловыделений от воздушнонагревателя и вентилятора после скачка к тепловыделениям перед скачком

Table 4. Changes in the ratios of the absolute heat outputs of the air heater and fan after the step change to their respective heat outputs before the step change

Режим I / Mode I																										
Интервал, с / Interval, s			$\bar{F}$																							
			0,5 → 0,8				0,8 → 0,6			0,6 → 0,5																
			От одиночных скачков From individual step changes				От одиночных скачков From individual step changes			От одиночных скачков From individual step changes																
25	50	100	$Q_h^{0,8}/Q_h^{0,5}$	1,32		$Q_h^{0,6}/Q_h^{0,8}$	0,77		$Q_h^{0,5}/Q_h^{0,6}$	0,99		$Q_f^{0,5}/Q_f^{0,6}$	0,34		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,41				
1,59	1,49		$Q_f^{0,8}/Q_f^{0,5}$	7,42		$Q_f^{0,6}/Q_f^{0,8}$	0,40		$u^{0,6}/u^{0,8}$	0,75		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21	
4,40	6,64		$u^{0,8}/u^{0,5}$	1,6		$u^{0,6}/u^{0,8}$	0,75		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83	
1,59	1,6		$\Delta t_h^{0,8}/\Delta t_h^{0,5}$	0,74		$\Delta t_h^{0,6}/\Delta t_h^{0,8}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1	
0,88	0,81		$\Delta t_f^{0,8}/\Delta t_f^{0,5}$	4,65		$\Delta t_f^{0,6}/\Delta t_f^{0,8}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53	
3,32	4,49		$Q_h^{0,8}/Q_h^{0,5}$	1,32		$Q_h^{0,6}/Q_h^{0,8}$	0,77		$Q_h^{0,5}/Q_h^{0,6}$	0,99		$Q_f^{0,5}/Q_f^{0,6}$	0,34		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,41		$Q_h^{0,8}/Q_h^{0,5}$	1,32	
0,63	3,34		$Q_f^{0,8}/Q_f^{0,5}$	7,42		$Q_f^{0,6}/Q_f^{0,8}$	0,40		$u^{0,6}/u^{0,8}$	0,75		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$Q_f^{0,8}/Q_f^{0,5}$	7,42	
1,59	1,49		$u^{0,8}/u^{0,5}$	1,6		$u^{0,6}/u^{0,8}$	0,75		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,8}/u^{0,5}$	1,6	
4,40	6,64		$\Delta t_h^{0,8}/\Delta t_h^{0,5}$	0,74		$\Delta t_h^{0,6}/\Delta t_h^{0,8}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,8}/\Delta t_h^{0,5}$	0,74	
1,59	1,6		$\Delta t_f^{0,8}/\Delta t_f^{0,5}$	4,65		$\Delta t_f^{0,6}/\Delta t_f^{0,8}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,8}/\Delta t_f^{0,5}$	4,65	
0,88	0,81		$Q_h^{0,8}/Q_h^{0,5}$	1,32		$Q_h^{0,6}/Q_h^{0,8}$	0,77		$Q_h^{0,5}/Q_h^{0,6}$	0,99		$Q_f^{0,5}/Q_f^{0,6}$	0,34		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,41		$Q_h^{0,8}/Q_h^{0,5}$	1,32	
3,32	4,49		$Q_f^{0,8}/Q_f^{0,5}$	7,42		$Q_f^{0,6}/Q_f^{0,8}$	0,40		$u^{0,6}/u^{0,8}$	0,75		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$Q_f^{0,8}/Q_f^{0,5}$	7,42	
1,59	1,6		$u^{0,8}/u^{0,5}$	1,6		$u^{0,6}/u^{0,8}$	0,75		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,8}/u^{0,5}$	1,6	
4,40	6,64		$\Delta t_h^{0,8}/\Delta t_h^{0,5}$	0,74		$\Delta t_h^{0,6}/\Delta t_h^{0,8}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,8}/\Delta t_h^{0,5}$	0,74	
1,59	1,6		$\Delta t_f^{0,8}/\Delta t_f^{0,5}$	4,65		$\Delta t_f^{0,6}/\Delta t_f^{0,8}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,8}/\Delta t_f^{0,5}$	4,65	
0,88	0,81		$Q_h^{0,8}/Q_h^{0,5}$	1,32		$Q_h^{0,6}/Q_h^{0,8}$	0,77		$Q_h^{0,5}/Q_h^{0,6}$	0,99		$Q_f^{0,5}/Q_f^{0,6}$	0,34		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,41		$Q_h^{0,8}/Q_h^{0,5}$	1,32	
3,32	4,49		$Q_f^{0,8}/Q_f^{0,5}$	7,42		$Q_f^{0,6}/Q_f^{0,8}$	0,40		$u^{0,6}/u^{0,8}$	0,75		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$Q_f^{0,8}/Q_f^{0,5}$	7,42	
1,59	1,6		$u^{0,8}/u^{0,5}$	1,6		$u^{0,6}/u^{0,8}$	0,75		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,8}/u^{0,5}$	1,6	
4,40	6,64		$\Delta t_h^{0,8}/\Delta t_h^{0,5}$	0,74		$\Delta t_h^{0,6}/\Delta t_h^{0,8}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,8}/\Delta t_h^{0,5}$	0,74	
1,59	1,6		$\Delta t_f^{0,8}/\Delta t_f^{0,5}$	4,65		$\Delta t_f^{0,6}/\Delta t_f^{0,8}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,8}/\Delta t_f^{0,5}$	4,65	
0,88	0,81		$Q_h^{0,8}/Q_h^{0,5}$	1,32		$Q_h^{0,6}/Q_h^{0,8}$	0,77		$Q_h^{0,5}/Q_h^{0,6}$	0,99		$Q_f^{0,5}/Q_f^{0,6}$	0,34		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,41		$Q_h^{0,8}/Q_h^{0,5}$	1,32	
3,32	4,49		$Q_f^{0,8}/Q_f^{0,5}$	7,42		$Q_f^{0,6}/Q_f^{0,8}$	0,40		$u^{0,6}/u^{0,8}$	0,75		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$Q_f^{0,8}/Q_f^{0,5}$	7,42	
1,59	1,6		$u^{0,8}/u^{0,5}$	1,6		$u^{0,6}/u^{0,8}$	0,75		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,8}/u^{0,5}$	1,6	
4,40	6,64		$\Delta t_h^{0,8}/\Delta t_h^{0,5}$	0,74		$\Delta t_h^{0,6}/\Delta t_h^{0,8}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,8}/\Delta t_h^{0,5}$	0,74	
1,59	1,6		$\Delta t_f^{0,8}/\Delta t_f^{0,5}$	4,65		$\Delta t_f^{0,6}/\Delta t_f^{0,8}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,8}/\Delta t_f^{0,5}$	4,65	
0,88	0,81		$Q_h^{0,8}/Q_h^{0,5}$	1,32		$Q_h^{0,6}/Q_h^{0,8}$	0,77		$Q_h^{0,5}/Q_h^{0,6}$	0,99		$Q_f^{0,5}/Q_f^{0,6}$	0,34		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,41		$Q_h^{0,8}/Q_h^{0,5}$	1,32	
3,32	4,49		$Q_f^{0,8}/Q_f^{0,5}$	7,42		$Q_f^{0,6}/Q_f^{0,8}$	0,40		$u^{0,6}/u^{0,8}$	0,75		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$Q_f^{0,8}/Q_f^{0,5}$	7,42	
1,59	1,6		$u^{0,8}/u^{0,5}$	1,6		$u^{0,6}/u^{0,8}$	0,75		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,8}/u^{0,5}$	1,6	
4,40	6,64		$\Delta t_h^{0,8}/\Delta t_h^{0,5}$	0,74		$\Delta t_h^{0,6}/\Delta t_h^{0,8}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,8}/\Delta t_h^{0,5}$	0,74	
1,59	1,6		$\Delta t_f^{0,8}/\Delta t_f^{0,5}$	4,65		$\Delta t_f^{0,6}/\Delta t_f^{0,8}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,8}/\Delta t_f^{0,5}$	4,65	
0,88	0,81		$Q_h^{0,8}/Q_h^{0,5}$	1,32		$Q_h^{0,6}/Q_h^{0,8}$	0,77		$Q_h^{0,5}/Q_h^{0,6}$	0,99		$Q_f^{0,5}/Q_f^{0,6}$	0,34		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,41		$Q_h^{0,8}/Q_h^{0,5}$	1,32	
3,32	4,49		$Q_f^{0,8}/Q_f^{0,5}$	7,42		$Q_f^{0,6}/Q_f^{0,8}$	0,40		$u^{0,6}/u^{0,8}$	0,75		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$Q_f^{0,8}/Q_f^{0,5}$	7,42	
1,59	1,6		$u^{0,8}/u^{0,5}$	1,6		$u^{0,6}/u^{0,8}$	0,75		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,8}/u^{0,5}$	1,6	
4,40	6,64		$\Delta t_h^{0,8}/\Delta t_h^{0,5}$	0,74		$\Delta t_h^{0,6}/\Delta t_h^{0,8}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,8}/\Delta t_h^{0,5}$	0,74	
1,59	1,6		$\Delta t_f^{0,8}/\Delta t_f^{0,5}$	4,65		$\Delta t_f^{0,6}/\Delta t_f^{0,8}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,53		$\Delta t_f^{0,8}/\Delta t_f^{0,5}$	4,65	
0,88	0,81		$Q_h^{0,8}/Q_h^{0,5}$	1,32		$Q_h^{0,6}/Q_h^{0,8}$	0,77		$Q_h^{0,5}/Q_h^{0,6}$	0,99		$Q_f^{0,5}/Q_f^{0,6}$	0,34		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	0,41		$Q_h^{0,8}/Q_h^{0,5}$	1,32	
3,32	4,49		$Q_f^{0,8}/Q_f^{0,5}$	7,42		$Q_f^{0,6}/Q_f^{0,8}$	0,40		$u^{0,6}/u^{0,8}$	0,75		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,21		$Q_f^{0,8}/Q_f^{0,5}$	7,42	
1,59	1,6		$u^{0,8}/u^{0,5}$	1,6		$u^{0,6}/u^{0,8}$	0,75		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,5}/u^{0,6}$	0,83		$u^{0,8}/u^{0,5}$	1,6	
4,40	6,64		$\Delta t_h^{0,8}/\Delta t_h^{0,5}$	0,74		$\Delta t_h^{0,6}/\Delta t_h^{0,8}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$	1,1		$\Delta t_h^{0,8}/\Delta t_h^{0,5}$	0,74	
1,59	1,6		$\Delta t_f^{0,8}/\Delta t_f^{0,5}$	4,65		$\Delta t_f^{0,6}/\Delta t_f^{0,8}$																				

Режим II / Mode II																		
Интервал, с / Interval, s			$\bar{F}$															
			0,5 → 0,8				0,8 → 0,6			0,6 → 0,5								
25	50	100	$\bar{Q}_h^{0,8}/\bar{Q}_h^{0,5}$		1,34	$\bar{Q}_f^{0,8}/\bar{Q}_f^{0,5}$		-4,62	$u^{0,8}/u^{0,5}$		1,61	$\Delta t_h^{0,8}/\Delta t_h^{0,5}$		0,73	От одиночных скачков From individual step changes			
			$\Delta t_f^{0,8}/\Delta t_f^{0,5}$			$\bar{Q}_h^{0,6}/\bar{Q}_h^{0,8}$			$\bar{Q}_f^{0,6}/\bar{Q}_f^{0,8}$			$u^{0,6}/u^{0,8}$			$\Delta t_h^{0,6}/\Delta t_h^{0,8}$		$\Delta t_f^{0,6}/\Delta t_f^{0,8}$	
			$\Delta t_f^{0,6}/\Delta t_f^{0,8}$			$\bar{Q}_h^{0,5}/\bar{Q}_h^{0,6}$			$\bar{Q}_f^{0,5}/\bar{Q}_f^{0,6}$			$u^{0,5}/u^{0,6}$			$\Delta t_h^{0,5}/\Delta t_h^{0,6}$		$\Delta t_f^{0,5}/\Delta t_f^{0,6}$	
	0,71		-2,49		-2,82		0,75		0,69		0,14		0,21		0,14			
	-1,73		-8,19		0,76		0,76		0,95		1,02		1,11		1,11			
	1,28		0,3		0,2		0,48		0,97		0,99		-1,11		-1,55			
	0,2		0,82		0,82		1,17		1,21		1,21		1,21		1,21			
	1,11		-1,32		-1,74		-1,08		1,11		1,11		1,11		1,11			
	-1,22		-1,32		-1,74		-1,08		1,11		1,11		1,11		1,11			
	-1,08		-1,32		-1,74		-1,08		1,11		1,11		1,11		1,11			

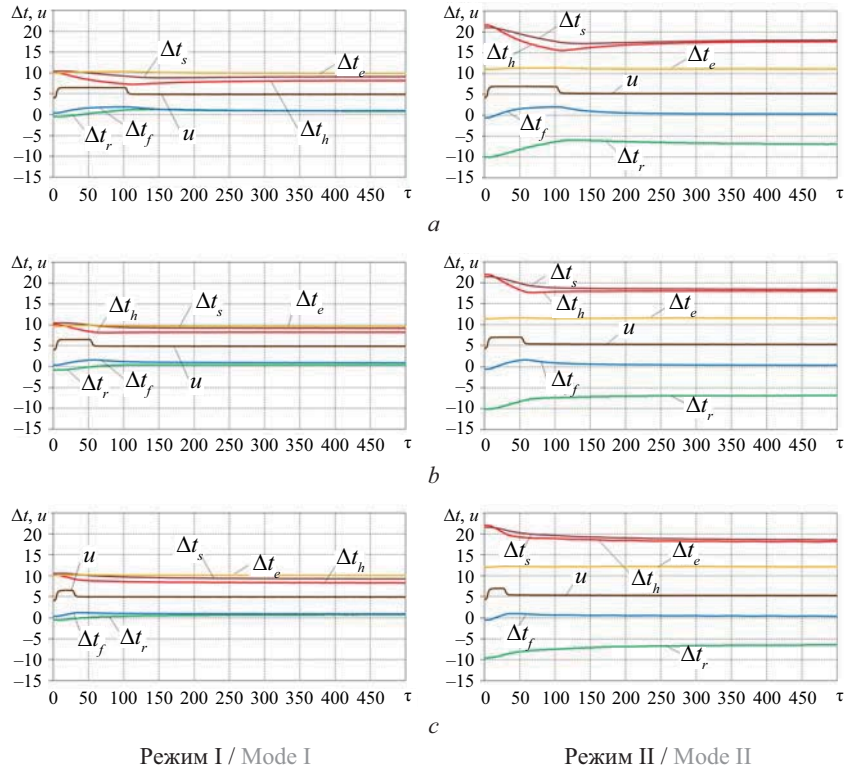


Рис. 5. Переходные процессы изменения разностей температур Δt_h , Δt_f , Δt_s и Δt_e : а — интервал 100 с; б — интервал 50 с; с — интервал 25 с

Fig. 5. Transients of temperature differences Δt_h , Δt_f , Δt_s and Δt_e : а — interval 100 s; б — interval 50 s; с — interval 25 s

занного с ним процесса, также инерционного, увеличения скорости потока u . Далее Δt_h снижается вплоть до второго скачка, причем скорость снижения зависит как от режима работы воздухонагревателя, так и от временного интервала между скачками (табл. 5). Сначала скорость снижения Δt_h увеличивается, потом уменьшается, что связано с теплоинерционностью тепловыделяющих элементов воздухонагревателя и быстрым изменением скорости потока u (табл. 1), на порядок превышающим скорость изменения разности температур (табл. 5).

При большей теплопроизводительности воздухонагревателя (II режим) скорость снижения Δt_h выше, чем при меньшей (I режим) из-за большего температурного напора между его теплообменной поверхностью и потоком. После второго скачка ($0,8 \rightarrow 0,6$), уменьшающего производительность вентилятора, скорость потока u снижается, а Δt_h увеличивается. Увеличение Δt_h происходит с замедлением из-за теплоинерционных свойств тепловыделяющих элементов

воздухонагревателя, влияющих на скорость теплоотдачи от теплообменной поверхности в поток. Поэтому при постоянном энергопотреблении воздухонагревателя теплоотдача во время переходного процесса меняется (о чем свидетельствует изменение Δt_h), так при увеличении производительности ($0,5 \rightarrow 0,8$) она растет, при уменьшении ($0,8 \rightarrow 0,6$) — снижается.

Изменение Δt_f имеет более сложный характер, так как при скачке производительности вентилятора меняется выделяемая им теплота в поток, а с изменением скорости потока u меняются тепловыделения от воздухонагревателя Q_h , определяющие температуру t_2 на входе в вентилятор. Отсюда следует, что изменение теплоотдачи во время переходного процесса между потоком и конструктивом вентилятора Q_f зависит от температуры на входе в него t_2 , от собственных тепловыделений, зависящих также и от скорости потока u . Все эти факторы с учетом теплоинерционности конструктива вентилятора, находящегося в потоке, влияют на продолжительность переходного

Табл. 5. Усредненные значения скорости изменения разностей температур, °C/с

Table 5. Average values of the rate of change of the temperature difference, °C/s

Интервал, с Interval, s	Режим I / Mode I				Режим II / Mode II			
	$\Delta t_h / \Delta \tau$	$\Delta t_f / \Delta \tau$	$\Delta t_s / \Delta \tau$	$\Delta t_e / \Delta \tau$	$\Delta t_h / \Delta \tau$	$\Delta t_f / \Delta \tau$	$\Delta t_s / \Delta \tau$	$\Delta t_e / \Delta \tau$
100	-0,027	0,015	-0,012	0,017	-0,062	0,027	-0,035	0,039
50	-0,037	0,027	-0,010	0,017	-0,084	0,048	-0,036	0,042
25	-0,035	0,032	-0,004	0,013	-0,081	0,058	-0,024	0,032

процесса. Перед первым скачком увеличения производительности вентилятора (0,5 → 0,8) Δt_f имеет для I режима положительное значение, для II отрицательное из-за незавершенности переходного процесса после скачка 0,6 → 0,5, что было описано ранее.

Для I режима после первого (0,5 → 0,8), второго (0,8 → 0,6) и особенно третьего (0,6 → 0,5) скачков, возвращающего установку к начальной производительности, Δt_f имеет всегда положительное значение, т.е. $\Delta t_f(\tau) > \Delta t_f(0) > 0$. Следовательно, за время наблюдений изменяющихся тепловыделений от вентилятора хватает, для того чтобы $t_3 > t_2$, т.е. скорости изменения температуры t_3 после вентилятора вполне достаточно для того, чтобы скорость изменения температуры t_2 не повлияла на появление отрицательных значений $\Delta t_f(\tau)$.

Для II режима в начале первого (0,5 → 0,8) скачка отмечается $\Delta t_f(0) < 0$ из-за незавершенности переходного процесса после третьего (0,6 → 0,5) скачка. Вероятность появления отрицательных значений $\Delta t_f(\tau)$ во II режиме в отличие от I ($t_3 < t_2$) объясняется, на взгляд автора, малыми значениями соотношения $\Delta Q_f/Q_h$.

Объяснить это явление можно следующим образом: теплопроизводительность воздушонагревателя Q_h в установившемся процессе для II режима в 2,2 раза больше, чем для I и практически постоянна, а изменения тепловыделений от вентилятора ΔQ_f зависят от величины скачка его производительности и режима работы воздушонагревателя. Так, при скачках 0,5 → 0,8, 0,8 → 0,6 и 0,6 → 0,5 (I режим), если брать изменение тепловыделений при скачке 0,6 → 0,5 за единицу, то соотношение тепловыделений ΔQ_f будут соответствовать 5,33:1,98:1,0. Для одного и того же скачка производительности вентилятора, например для 0,8 → 0,6, но для разных режимов работы воздушонагревателя, если брать изменение тепловыделений при I режиме за единицу, соотношение тепловыделений ΔQ_f будут соответствовать отношению 0,47:1,0. Следовательно, с увеличением теплопроизводительности воздушонагревателя из-за роста температуры t_2 на входе в вентилятор ΔQ_f снижаются и увеличиваются с увеличением скачка производительности вентилятора.

Существенное увеличение продолжительности переходного процесса для II режима связано с появлением отрицательных значений Δt_f после скачка

0,6 → 0,5. В табл. 6 приведены данные по соотношениям $\Delta Q_f/Q_h$ для одиночных скачков, соответствующих режимам работы воздушонагревателя. Как видно из табл. 6, наличие отрицательных значений Δt_f обусловлено соотношением $\Delta Q_f/Q_h$. Следовательно, сочетание более высокой теплопроизводительности воздушонагревателя и меньшей величины скачка расхода воздуха увеличивает вероятность появления отрицательных значений Δt_f в период переходного процесса, что в результате увеличивает его продолжительность. Отсюда следует, что при небольших изменениях производительности вентилятора и значительных тепловыделениях воздушонагревателя величины первого и второго скачков должны быть больше, сумма которых определяет результирующую величину скачка. Поэтому рекомендуется для систем с переменным расходом воздуха предусматривать возможность увеличения производительности вентилятора на 15–20 % относительно расчетной за счет, например, использования частотного регулирования.

При разгоне потока в течение переходного процесса разница Δt_s положительна и к концу уменьшается, т.е. $\Delta t_s(\tau^*) < \Delta t_s(0)$ и Δt_s располагается над Δt_h , так как к Q_h добавляются Q_f . Из рис. 6 видно, что вид кривых Δt_h и Δt_s между скачками отличается вогнутостью: менее вогнутый для I режима, чем для II. Скорости изменения температур t_2 и t_3 определяют глубину вогнутости кривых, зависящие, в свою очередь, от скачка производительности вентилятора и от теплопроизводительности воздушонагревателя.

При скачке 0,5 → 0,8 рост u уменьшает Δt_h и Δt_s , и чем выше при этом теплопроизводительность воздушонагревателя, тем интенсивнее теплосъем с его теплообменных поверхностей, и тем быстрее уменьшаются разности температур Δt_h и Δt_s . Вместе с тем увеличиваются Q_f тормозящие уменьшение Δt_s , причем, чем выше теплопроизводительность воздушонагревателя, тем интенсивнее изменяются Q_f из-за более быстрого падения температуры t_2 . В конечном итоге, чем больше теплопроизводительность воздушонагревателя, тем меньше отношение $\Delta Q_f/Q_h$, тем ближе Δt_s располагается над Δt_h (рис. 5). Следовательно, доминирующим фактором, влияющим на продолжительность переходного процесса, является теплопроизводительность воздушонагревателя.

Глубина вогнутости кривой Δt_h и зависящая от нее высота выпуклости кривой Δt_f определяют вид

Табл. 6. Анализ динамики отношения тепловыделений от вентилятора к теплопроизводительности воздушонагревателя
Table 6. Analysis of the dynamics of the ratio of heat emissions from the fan to the heating capacity of the air heater

Скачок производительности вентилятора Fan output step change	Режим I / Mode I		Режим II / Mode II	
	$\Delta Q_f/Q_h$	Δt_f	$\Delta Q_f/Q_h$	Δt_f
0,5 → 0,8	+0,17	$\Delta t_f > 0$	+0,11	$\Delta t_f > 0$
0,8 → 0,6	–0,13	$\Delta t_f > 0$	–0,10	$\Delta t_f > 0$
0,6 → 0,5	–0,04	$\Delta t_f > 0$	–0,01	$\Delta t_f < 0$ (незавершен) (unfinished)

Табл. 7. Глубина вогнутости и высота выпуклости кривых разностей температур

Table 7. Depth of concavity and height of convexity of temperature difference curves

Интервал, с Interval, s	Режим I / Mode I			Режим II / Mode II		
	$\Delta t_h/\Delta t_h(\tau^*)$	$\Delta t_f/\Delta t_f(\tau^*)$	$\Delta t_s/\Delta t_s(\tau^*)$	$\Delta t_h/\Delta t_h(\tau^*)$	$\Delta t_f/\Delta t_f(\tau^*)$	$\Delta t_s/\Delta t_s(\tau^*)$
100	-0,109	+1,03	-0,031	-0,123	+4,78	-0,046
50	-0,014	+0,77	-0,001	-0,018	+3,16	-0,001
25	-0,059	+0,73	-0,022	-0,003	+1,28	-0,002

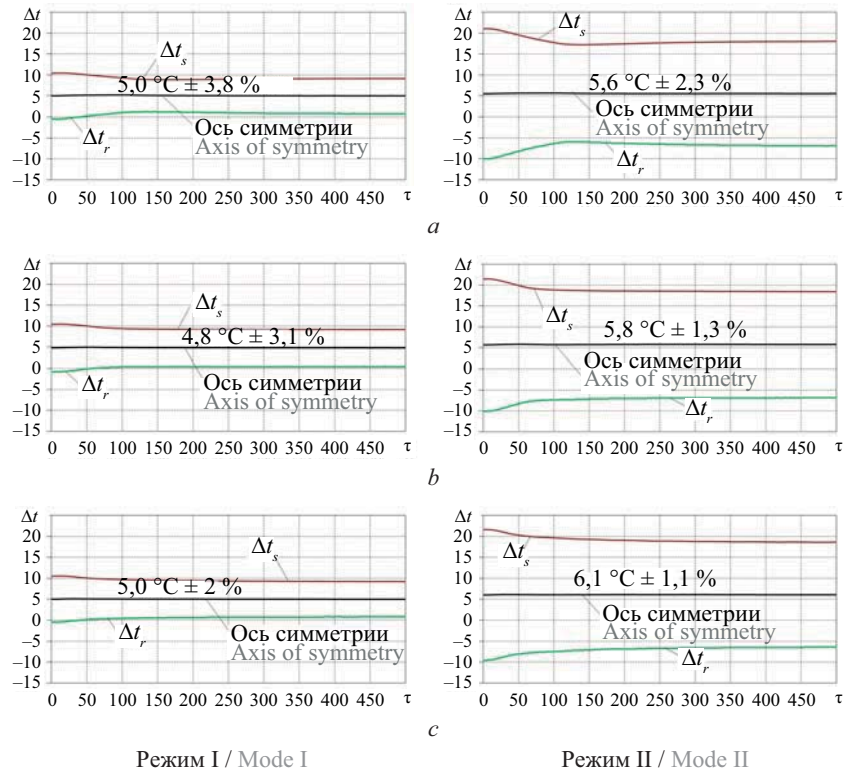


Рис. 6. Переходные процессы изменения перепада температуры Δt_s и Δt_r : а — интервал 100 с; б — интервал 50 с; с — интервал 25 с

Fig. 6. Transients of temperature drop changes Δt_s and Δt_r : а — interval 100 s; б — interval 50 s; с — interval 25 s

кривой Δt_s , показывая степень перерегулирования параметров потока воздуха. Для выявления глубины вогнутости Δt_h , Δt_s и высоты выпуклости Δt_f обобщим данные в табл. 7 и отнесем их к значениям $\Delta t(\tau^*)$ в конце переходного процесса для каждого элемента системы: $\Delta t_h/\Delta t_h(\tau^*)$ и $\Delta t_f/\Delta t_f(\tau^*)$ и установки $\Delta t_s/\Delta t_s(\tau^*)$. Плюс перед долей означает выпуклость, минус — вогнутость. Глубина вогнутости кривых Δt_h и Δt_s в случае разгона потока уменьшается и практически исчезает при сокращении времени между скачками.

Выпуклость кривой Δt_f наблюдается даже для минимального времени между скачками. Это объясняется различными скоростями изменения температур потока до вентилятора и после него. При этом выпуклость Δt_f частично компенсирует вогнутость Δt_h , вследствие чего вогнутость Δt_s меньше, чем у Δt_h . В ре-

зультате переходный процесс для обоих режимов работы воздухонагревателя сокращается. Из табл. 7 также видно, что существует оптимальное время между скачками, при котором вогнутость Δt_s минимальна и, следовательно, продолжительность переходного процесса короче.

На рис. 6 представлены переходные процессы Δt_r отклика помещения на изменение параметров приточного воздуха Δt_s . Из рис. 6 видно, что разности Δt_r и Δt_s практически симметричны относительно некой оси времени. Из этого следует, что возмущение параметров микроклимата можно погасить рассчитанными скачкообразными изменениями производительности элементами климатической установки при минимальных расходах материальных и энергетических ресурсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обработка результатов экспериментальных исследований позволила сделать следующие выводы:

1. Продолжительность процессов изменения скорости потока при разгоне и замедлении частоты вращения рабочего колеса вентилятора зависит в основном от аэродинамической характеристики сопротивления вентиляционной сети, и чем она значительнее, тем продолжительнее будет отставание изменения скорости потока от изменения частоты вращения рабочего колеса нагнетателя.

2. При скачке производительности интенсивность процесса изменения разности температуры потока, проходящего через вентилятор, определяется динамикой теплообмена между вентилятором и потоком с меняющейся температурой на входе в него. При этом он тормозится двумя процессами, стремящимися замедлить изменение температуры потока после вентилятора: изменением тепловыделений от электродвигателя из-за изменения частоты вращения и за счет тепловой инерции конструктива вентилятора.

3. Для сокращения продолжительности переходного процесса при скачке производительности вентилятора необходимо добиваться максимального соотношения изменений тепловыделений от вентилятора к изменениям тепловыделений от воздухонагревателя.

4. Величины противофазных скачков, сумма которых определяет результирующую величину скачка при необходимом изменении производительности вентилятора, должны быть тем больше, чем значительнее тепловыделения воздухонагревателя.

5. Существует оптимальный временной интервал между последовательными скачками, при котором достигается минимальная продолжительность переходного процесса изменения параметров потока, проходящего через установку «воздухонагреватель – вентилятор».

В качестве рекомендаций: показания температуры зависят от скорости набегающего потока воздуха, омывающего чувствительный элемент датчика. Чем значительнее изменение скорости потока, тем существеннее будет отклонение показаний датчика от показаний, предшествующих скачку производительности вентилятора из-за изменения теплообмена между корпусом датчика с чувствительным элементом — термосопротивлением и потоком воздуха. Для исключения влияния скорости потока на показания датчика температуры необходимо использовать датчики с минимальной тепловой инерцией, работа которых основана на термоэлектрическом эффекте (явление Зеебека), т.е. применять термопары или компенсировать отклонение вводом поправки, учитывающей скорость набегающего потока воздуха.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Авдошенко П.А., Мясников В.А. Автоматизация центральных тепловых пунктов на базе систем частотного регулирования // Вестник военной академии материально-технического обеспечения. 2015. № 1. С. 109–116. EDN VNYUEH.

2. Тимофеев Е.В., Эрк А.Ф., Размук В.А. Регулирование температуры воздуха в животноводческом помещении с использованием частотных регуляторов // Проблемы современной науки и инновации. 2017. № 5. С. 55–64. EDN YZKGOF.

3. Teitel M., Levi A., Zhao Y., Barak M., Barlev E., Shmuel D. Energy saving in agricultural buildings through fan motor control by variable frequency drives // Energy and Buildings. 2008. Vol. 40. Issue 6. Pp. 953–960. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.07.010

4. Вишневецкий Е.П., Малков Г.В. ЕС-двигатели: что, где, почему и зачем // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2011. № 3. С. 52–59. EDN NUNXZZ.

5. Singh N., Permana I., Chung R., Wang F. Retro-fitting Application of EC Motor Plug Fans in HVAC systems // 2024 ASHRAE Annual Conference. 2024. DOI: 10.63044/s24sing007

6. Костин В.И., Должиков В.Н. Регулирование насосов и вентиляторов в системах инженерного обеспечения зданий и сооружений // Известия высших

учебных заведений. Строительство. 2019. № 9 (729). С. 52–59. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-729-9-52-59. EDN KPTWEX.

7. Lee J.M., Lee K.H., Moon J.W., Lee S.H., Hong T. Developing a Control Strategy for Minimum Airflow Setting Considering CO₂ Level and Energy Consumption in a Variable Air Volume System // International Journal of Thermophysics. 2024. Vol. 45. Issue 12. DOI: 10.1007/s10765-024-03474-5. EDN ERLCHN.

8. Lin X., Lee H., Hwang Y., Radermacher R. A review of recent development in variable refrigerant flow systems // Science and Technology for the Built Environment. 2015. Vol. 21. Issue 7. Pp. 917–933. DOI: 10.1080/23744731.2015.1071987

9. Крылов Ю.А., Радионов А.А., Карандаев А.С., Храмушин В.Р., Мамлеева Ю.И. Энергосберегающий алгоритм управления электроприводами насосов в системе холодного водоснабжения зданий // Электротехника. 2014. № 4. С. 10–15. EDN RXXEGV.

10. Ormsbee L.E., Lansey K.E. Optimal control of water supply pumping systems // Journal of Water Resources Planning and Management. 1994. Vol. 120. Issue 2. Pp. 237–252. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:2(237)

11. Морозова Н.С., Нагорная А.Н. Аэродинамика кольцевых вентиляционных сетей с переменным расходом воздуха // Сантехника, Отопление,

Кондиционирование. 2016. № 2 (170). С. 62–63. EDN XCRUAR.

12. Белова Е.М., Караджи В.Г. Особенности работы вентилятора с переменным числом оборотов в вентиляционной сети // Системные технологии. 2022. № 1 (42). С. 146–154. DOI: 10.55287/22275398_2022_1_146. EDN WFGGWM.

13. Wu W., Lin Y.R., Chow L.C., Leland Q. Fan performance characteristics at various rotational speeds and ambient pressures // SAE Technical Paper Series. 2014. Issue 1. DOI: 10.4271/2014-01-2219

14. Нагорная А.Н., Морозова Н.С. Проблемы организации воздухораспределения при вытесняющей вентиляции с переменным расходом воздуха на примере зрительного зала театра // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. Т. 13. № 2. С. 65–68. EDN RPVCOP.

15. Панферов С.В., Панферов В.И. К решению задачи количественного регулирования в системах теплоснабжения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Т. 24. № 1. С. 50–58. DOI: 10.14529/build240107. EDN AEMYUQ.

16. Сикерин И.Е., Голяк С.А. Влияние гидравлического режима сети теплоснабжения на тепловую устойчивость абонентов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2010. Т. 2. № 68. С. 20–22. EDN OVZYAF.

17. Абдулаев Д.А., Маркелова Е.А., Сабирзянов А.Р., Миронов Н.Ю. Гидравлическая устойчивость тепловой сети // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 1 (52). С. 67–85. DOI: 10.18720/CUBS.52.6. EDN YNESJB.

18. Bukowska M., Nowak K. Hydraulic Stabilization of Heat Network // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 603. Issue 5. P. 052091. DOI 10.1088/1757-899X/603/5/052091

19. Малахов П.И., Гуцин С.В., Семиненко А.С., Киреев В.М. Влияние подключения новых потребителей на гидравлическую устойчивость тепловых сетей // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 8. С. 82–87. DOI: 10.12737/article_5968b450a65e68.85903478. EDN ZCRBCR.

20. Мансуров Р.Ш., Перязев Д.Г. Влияние скорости роста температуры наружного воздуха в отопительный период года на гидравлическую устойчивость системы теплоснабжения // Инвестиции, градостроительство, технологии как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения : мат. XV Междунар. науч.-практ. конф. 2025. С. 41–47. EDN RSCMVA.

21. Seminenko A.S., Sheremet E.O., Gushchin S.V., Elistratova J.V., Kireev V.M. Hydraulic stability of heat networks for connection of new consumers // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. P. 042105. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042105. EDN XXSRQD.

22. Ю С.С., Ивашкевич А.А. Метод стабилизации расходов в ответвлениях систем вентиляции с переменным расходом воздуха // Новые идеи нового века : мат. Междунар. науч. конф. ФАД ТОГУ. 2020. Т. 3. С. 566–572. EDN FZHCPE.

23. Пензин В.Э., Спиридонова Е.В. VAV-система-система вентиляции с переменным расходом воздуха // Инновации природообустройства и защиты окружающей среды : мат. I Национ. науч.-практ. конф. с междунар. участием. 2019. С. 55–57. EDN ZAHBEL.

24. Крысов Е.Н. Системы вентиляции с переменным расходом // Ученые заметки ТОГУ. 2016. Т. 7. № 4–1. С. 868–871. EDN XSDEMT.

25. Engdahl F., Svensson A. Pressure controlled variable air volume system // Energy and Buildings. 2003. Vol. 35. Issue 11. Pp. 1161–1172. DOI: 10.1016/j.enbuild.2003.09.009

26. Гавриленко Ю.А. Конструирование систем вентиляции с переменным расходом воздуха // Инновации в науке, образовании и бизнесе – 2013 : тр. XI Междунар. науч. конф. 2013. С. 354–356. EDN ZEEVGJ.

27. Посохин В.Н., Сафиуллин Р.Г. Воздухораспределитель с изменяемой геометрией // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2014. № 4 (148). С. 74–77. EDN TWQWQJ.

28. Кузьмин С.И. Воздухораспределитель для реализации переменного воздухообмена в помещениях : сб. науч. тр. Ангарского государственного технического университета. 2011. Т. 1. № 1. С. 110–115. EDN RADDZB.

29. Rabani M., Madessa H.B., Nord N., Schild P., Mysen M. Performance assessment of all-air heating in an office cubicle equipped with an active supply diffuser in a cold climate // Building and Environment. 2019. Vol. 156. Pp. 123–136. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.04.017

30. Ватузов Д.Н., Дымищ М.В., Чичаев Д.В. Исследование работы регуляторов перепада давления в зависимости от места их установки в ИТП // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии : сб. ст. 81-й Всеросс. науч.-техн. конф. 2024. С. 588–593. EDN ALOKYD.

31. Поляков В.И. Квартирные регуляторы давления воды // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2013. № 11 (143). С. 34–37. EDN TQTRRV.

32. Звонарева Ю.Н., Ваньков Ю.В., Сабиров И.М. Влияние температурного графика работы

тепловой сети и использования регуляторов перепада давления на надежность работы систем теплоснабжения // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики : мат. 96-го заседания Междунар. научного семинара им. Ю.Н. Руденко. 2024. С. 558–567. EDN IXFVGA.

Поступила в редакцию 20 января 2026 г.

Принята в доработанном виде 28 апреля 2026 г.

Одобрена для публикации 3 мая 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: **Рустам Шамильевич Мансуров** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)**; 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, д. 113; ORCID: 0000-0002-1490-5631; rmansurov@inbox.ru.

REFERENCES

1. Avdoshenko P.A., Myasnikov V.A. Automation of central heating points based on frequency control systems. *Bulletin of the Military Academy of Logistics*. 2015; 1:109-116. EDN VNYUEH. (rus.).
2. Timofeev E.V., Erk A.F., Razmuk V.A. Regulation of air temperature in the cattle-breeding premises using frequency regulators. *Problems of Modern Science and Innovation*. 2017; 5:55-64. EDN YZKGOF. (rus.).
3. Teitel M., Levi A., Zhao Y., Barak M., Barlev E., Shmuel D. Energy saving in agricultural buildings through fan motor control by variable frequency drives. *Energy and Buildings*. 2008; 40(6):953-960. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.07.010
4. Vishnevsky E.P., Malkov G.V. EC engines: what, where, why and why. *AVOK*. 2011; 3:52-59. EDN NUNXZZ. (rus.).
5. Singh N., Permana I., Chung R., Wang F. Retrofitting Application of EC Motor Plug Fans in HVAC systems. *2024 ASHRAE Annual Conference*. 2024. DOI: 10.63044/s24sing007
6. Kostin V.I., Dolzhikov V.N. Regulation of pumps and fans in engineering systems of buildings and structures. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2019; 9(729):52-59. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-729-9-52-59. EDN KPTWEX. (rus.).
7. Lee J.M., Lee K.H., Moon J.W., Lee S.H., Hong T. Developing a Control Strategy for Minimum Airflow Setting Considering CO₂ Level and Energy Consumption in a Variable Air Volume System. *International Journal of Thermophysics*. 2024; 45(12). DOI: 10.1007/s10765-024-03474-5. EDN ERLCHH.
8. Lin X., Lee H., Hwang Y., Radermacher R. A review of recent development in variable refrigerant flow systems. *Science and Technology for the Built Environment*. 2015; 21(7):917-933. DOI: 10.1080/23744731.2015.1071987
9. Krylov Yu.A., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Mamleeva Yu.I. An energy-saving algorithm of control of electric drives of pumps in the cold water-supply system of buildings. *Electrical Engineering*. 2014; 4:10-15. EDN RXXEGV. (rus.).
10. Ormsbee L.E., Lansey K.E. Optimal control of water supply pumping systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 1994; 120(2):237-252. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:2(237)
11. Morozova N.S., Nagornaya A.N. Aerodynamics of annular ventilation networks with variable air flow. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2016; 2(170):62-63. EDN XCRUAR. (rus.).
12. Belova E.M., Karadzhii V.G. Features of operation of a fan with a variable speed in the ventilation network. *System Technologies*. 2022; 1(42):146-154. DOI: 10.55287/22275398_2022_1_146. EDN WFGGWM. (rus.).
13. Wu W., Lin Y.R., Chow L.C., Leland Q. Fan performance characteristics at various rotational speeds and ambient pressures. *SAE Technical Paper Series*. 2014; 1. DOI: 10.4271/2014-01-2219
14. Nagornaya A.N., Morozova N.S. Problems of air distribution at displacement ventilation and variable air volume on the basis of the theatre hall. *Bulletin of SUSU. Series: Construction Engineering and Architecture*. 2013; 13(2):65-68. EDN RPVCOP. (rus.).
15. Panferov S.V., Panferov V.I. Quantitative regulation in heat supply systems. *Bulletin of SUSU. Series: Construction Engineering and Architecture*. 2024; 24(1): 50-58. DOI: 10.14529/build240107. EDN AEMYYQ. (rus.).
16. Sikerin I.E., Golyak S.A. The influence of the hydraulic regime of the heat supply network on the thermal stability of subscribers. *Current Problems of Modern Science, Technology and Education*. 2010; 2(68):20-22. EDN OVZYAF. (rus.).
17. Abdulaev D., Markelova Ye., Sabirzyanov A., Mironov N. The hydraulic stability of the heating network. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2017; 1(52):67-85. DOI: 10.18720/CUBS.52.6. EDN YNESJB. (rus.).

18. Bukowska M., Nowak K. Hydraulic Stabilization of Heat Network. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2019; 603(5):052091. DOI: 10.1088/1757-899X/603/5/052091
19. Malakhov P.I., Gushchin S.V., Seminenko A.S., Kireev V.M. The influence of connecting new consumers on the hydraulic stability of heating networks. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2017; 8:82-87. DOI: 10.12737/article_5968b450a65e68.85903478. EDN ZCRBCR. (rus.).
20. Mansurov R.Sh., Peryazev D.G. The influence of the rate of increase in outdoor air temperature during the heating season on the hydraulic stability of the heat supply system. *Investments, urban planning, technologies as drivers of socio-economic development of the territory and improvement of the quality of life of the population : proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference*. 2025; 41-47. EDN RSCMVA. (rus.).
21. Seminenko A.S., Sheremet E.O., Gushchin S.V., Elistratova J.V., Kireev V.M. Hydraulic stability of heat networks for connection of new consumers. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2018; 327:042105. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042105. EDN XXSRQD.
22. Yu S.S., Ivashkevich A.A. Costs' stabilizing method in branches of ventilation systems with variable air flow. *New ideas of the new century : proceedings of the international scientific conference FAD TOGU*. 2020; 3:566-572. EDN FZHCPE. (rus.).
23. Penzin V.E., Spiridonova E.V. VAV-system-ventilation system with variable air flow. *Innovations of environmental management and environmental protection : Proceedings of the First National Scientific and Practical Conference with international participation*. 2019; 55-57. EDN ZAHBEL. (rus.).
24. Krysov E.N. Ventilation system with variable flow. *Scientists notes PNU*. 2016; 7(4-1):868-871. EDN XSDEMT. (rus.).
25. Engdahl F., Svensson A. Pressure controlled variable air volume system. *Energy and Buildings*. 2003; 35(11):1161-1172. DOI: 10.1016/j.enbuild.2003.09.009
26. Gavrilenko Yu.A. Design of ventilation systems with variable air flow. *Innovations in science, education and business – 2013 : Proceedings of the XI International Scientific Conference*. 2013; 354-356. EDN ZEEVGJ. (rus.).
27. Posokhin V.N., Safiullin R.G. Variable geometry air distributor. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2014; 4(148):74-77. EDN TWQWQJ. (rus.).
28. Kuzmin S.I. An air distributor for the implementation of variable air exchange in rooms : *Collection of scientific papers of the Angarsk State Technical University*. 2011; 1(1):110-115. EDN RADDZB. (rus.).
29. Rabani M., Madessa H.B., Nord N., Schild P., Mysen M. Performance assessment of all-air heating in an office cubicle equipped with an active supply diffuser in a cold climate. *Building and Environment*. 2019; 156: 123-136. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.04.017
30. Vatzov D.N., Dymshits M.V., Chichaev D.V. Investigation of the operation of differential pressure regulators depending on their installation location in the ITP. *Traditions and innovations in construction and architecture. Construction and construction technologies : Collection of articles of the 81st All-Russian Scientific and Technical Conference*. 2024; 588-593. EDN ALOKYD. (rus.).
31. Polyakov V.I. Apartment water pressure regulators. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2013; 11(143):34-37. EDN TQTRRV. (rus.).
32. Zvonareva Yu.N., Vankov Yu.V., Sabirov I.M. The influence of the temperature schedule of the heating network and the use of differential pressure regulators on the reliability of heat supply systems. *Methodological issues of reliability research of large energy systems : materials of the 96th meeting of the International Scientific Seminar named after Y.N. Rudenko*. 2024; 558-567. EDN IXFVGA. (rus.).
33. Zhilina T.S., Sabukevich M.N., Dan V.D., Janaka V. The use of booster pumping stations for the modernization of heat supply systems. *Architecture, construction, transport*. 2024; 2(108):56-66. DOI: 10.31660/2782-232X-2024-2-56-66. EDN MHOSAZ. (rus.).

Received January 20, 2026.

Adopted in revised form on April 28, 2026.

Approved for publication on May 3, 2026.

B I O N O T E S : **Rustam Sh. Mansurov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat and Gas supply and Ventilation; **Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)**; 113 Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-1490-5631; rmansurov@inbox.ru.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 658.531:331.1:69.007-05

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1210-1228

Инженерная часть детерминированной модели организационно-технологической надежности строительства объектов в условиях Арктического региона

Роман Владимирович Мотылев¹, Владимир Вячеславович Сокольников²

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия;

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Отмечена актуальность концепции детерминированной модели (ДМ) организационно-технологической надежности строительства (ОТН) для развития и освоения Арктического региона России. Изложены методы разработки ДМ ОТН. В том числе даны инженерные формулировки определений ключевых понятий, цели разработки ДМ ОТН, показано применение метода описания ОТН с позиций общей теории систем, выполнено структурирование ДМ ОТН на математическую и инженерную части, рассмотрена связь ДМ ОТН с информационными технологиями.

Материалы и методы. При описании ОТН как системы в явном виде показано ее влияние на результат строительного периода инвестиционного проекта. Инженерная часть ДМ ОТН представлена как метод координации исполнителей организации и управления строительным производством при решении технологически и организационно связанных задач выполнения технологических процессов в проектных отметках объекта капитального строительства и их ресурсного обеспечения. Практической основой инженерной части ДМ ОТН показана штатная схема координации исполнителей, алгоритмически связанная с математической частью ДМ ОТН.

Результаты. Результаты исследования приведены в виде системы символьных выражений характеристик системы ОТН, анализа свойств специальных сферических функций высшего математического анализа применительно к теме исследования, в виде таблицы штатной схемы координации решения производственных задач, соответствующей ей имитационной модели функционирования инженерной части ДМ ОТН, в свою очередь, параметрически связанной с математической частью модели, а также в виде таблицы сравнения эксплуатационных характеристик различных платформ разработки специального программного и коммуникационного обеспечения функционирования ДМ ОТН.

Выводы. Применение ДМ ОТН позволит своевременно прогнозировать и устранять неблагоприятные тенденции производства. Разработка ДМ ОТН является перспективной, со среднесрочной продолжительностью, комплексной, выполняемой специалистами различных специальностей: технологии возведения зданий и сооружений, организации строительного производства, управления строительным производством, управления производственной деятельностью предприятия, а также IT-специалистами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: организационно-технологическая надежность строительства, детерминированная модель, организация строительного производства, управление инвестиционными проектами

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мотылев Р.В., Сокольников В.В. Инженерная часть детерминированной модели организационно-технологической надежности строительства объектов в условиях Арктического региона // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 7. С. 1210–1228. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1210-1228

Автор, ответственный за переписку: Роман Владимирович Мотылев, motylev@yandex.ru.

Engineering aspect of a deterministic model of organizational and technological reliability in the construction of facilities in the Arctic region

Roman V. Motylev¹, Vladimir V. Sokolnikov²

¹ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
St. Petersburg, Russian Federation;

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS); St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper notes the relevance of the concept of a deterministic model of organizational and technological reliability of construction (DM OTR) for the development and exploration of the Arctic region in Russia. The methods of developing the DM of OTR are presented. Including engineering formulations of definitions of key concepts, the goals of developing the DM of OTR, the application of the method of describing organizational and technological reliability (OTR) from the standpoint of the general theory of systems is shown, the DM of OTR is structured into mathematical and engineering parts, the connection of the DM of OTR with information technologies is considered.

Materials and methods. When describing the OTR as a system, its influence on the result of the construction period of the investment project is clearly shown. The engineering part of the DM OTR is described as a method of coordinating the performers of the organization and management of construction production in solving technologically and organizationally related tasks of performing technical processes in the design marks of a capital construction project and their resource provision. The practical basis of the engineering part of the DM OTR in the article is the standard scheme of coordination of performers, algorithmically connected with the mathematical part of the DM OTR.

Results. Results of the research carried out within the framework of the article are presented in the form of a system of symbolic expressions of the characteristics of the OTR system, an analysis of the properties of special spherical functions of higher mathematical analysis in relation to the topic of the article, in the form of a table of the staffing scheme for coordinating the solution of production problems the corresponding simulation model of the functioning of the engineering part of the DM OTR, in turn parametrically connected with the mathematical part of the model, as well as in the form of a comparison table of the operational characteristics of various platforms for the development of special software and communication support for the functioning of the DM OTR.

Conclusions. Conclusions were made that the use of DM OTR will allow for timely prediction and elimination of unfavorable production trends. The development of the DM OTR is promising, with a medium-term duration, complex, carried out by specialists of various specialties: technology of construction of buildings and structures, organization of construction production, management of construction production, management of production activities of the enterprise, as well as IT specialists.

KEYWORDS: organizational and technological reliability of construction, deterministic model, organization of construction production, management of investment projects

Acknowledgments. The authors thank the reviewers for their helpful comments.

FOR CITATION: Motylev R.V., Sokolnikov V.V. Engineering aspect of a deterministic model of organizational and technological reliability in the construction of facilities in the Arctic region. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(7):1210-1228. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1210-1228 (rus.).

Corresponding author: Roman V. Motylev, motylev@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Важность освоения и развития регионов Арктики понимают как правительства развитых стран, так и наука и бизнес [1, 2]. В Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (Указ Президента РФ от 01.12.2016 № 642 в подпункте е) п. 20) указаны его основные направления. Любое развитие территорий предполагает задействование ресурсов строительного комплекса на базе научно-технических решений, полученных применительно к размеру, а также к климатическим, транспортным, демографическим и производственным условиям региона. Для успешного развития обширного Арктического региона РФ с суровыми климатическими условиями ключевую роль играют как строительство перспективных объектов добычи полезных ископаемых, так и строительство и поддержание производственной базы строительного сектора региона.

Научно обоснованное распределение по территории региона производственно-технических и складских баз, обеспечивающих строительные предприятия необходимой номенклатурой, сбалансированное с порядком ввода в эксплуатацию перспективных объектов экономики, определяет рациональную коммуникационную сеть для различных видов транспорта, что в совокупности позволяет предусмотреть оптимальные соотношения сроков и затрат ресурсов на промышленное развитие региона, включающее формирование нормальных социально-бытовых

условий трудящихся. Такое распределение требует обоснования не только экономической моделью эффективности капитальных вложений по срокам окупаемости, но и инженерно-технической теоретической моделью, которая, в свою очередь, является результатом разработки и развития научной теоретической модели организации и управления рассредоточенным (строительным) производством. Наряду с климатическими, транспортными и социально-экономическими условиями, размеры региона, задачи и методы его развития вносят дополнительные требования к содержанию инженерной модели организации и управления рассредоточенным (строительным) производством. Концепция организационно-технологической надежности (ОТН) строительства [3–10] обосновывает разработку как вероятностных, так и детерминированных моделей (ДМ) указанного свойства строительства.

ГОСТ Р 27 102–2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения» обозначает надежность как «способность», т.е. в понятиях определения более общего свойства «качество». Инженерный синоним надежности — «безотказность». В инженерной практике «безотказность» описывается расчетным или установленным статистическими методами значением вероятности отказа при контрольном числе срабатываний устройства (системы устройств), или времени его (их) штатной эксплуатации. На этом основании концепцию ОТН

строительства можно трактовать как «вероятность отказа», т.е., как минимум, остановки производства, или срыва сроков и тому подобное, что и исследуется методом разработки вероятностных моделей разнообразных рисков строительства [11, 12]. Можно исследовать «кадрово-квалификационную надежность», «надежность эксплуатации комплекса машин и механизмов в период строительства», «надежность снабжения» [13] и т.д.

Цель разработки и практического применения ДМ ОТН [14] — создание алгоритмизированного механизма поэтапного установления и регулирования в оперативный период рациональных соотношений параметров организации производства и снабжения, параметров и темпа выполняемых технологических процессов, параметров текущей строительной готовности объекта, а также параметров управления строительством. Рассчитанная по ДМ величина текущего значения ОТН — это число, характеризующее актуальные значения указанных соотношений и называемое в теории вариационного исчисления «функционал», показывает рациональность текущих соотношений ДМ ОТН. Рациональность определяется степенью (критерием, входящим в ДМ ОТН) их соответствия плановым значениям готовности или расходования ресурсов, строительной готовности объекта, сроков и стоимости строительства в текущий период. Расчетная величина, дополненная вероятностью «отказа» производства, будет научно обоснованной характеристикой строительного производства, его ОТН. Для достижения цели разработки ДМ ОТН необходимо обосновать вид зависимости функции ОТН от соотношений параметров организации и управления строительным проектом в периоды подготовки и выполнения строительных работ, вид ее граничных условий, номенклатуру параметров организации и управления, принятые актуальные соотношения которых сформируют переменные ДМ ОТН. Основными задачами практической реализации ДМ ОТН являются увязка граничных условий модели с нормативными требованиями в области организации и управления, разработка и эксплуатация участниками инвестиционно-строительных проектов специализированного программного и коммуникационного обеспечения.

Цель настоящего исследования — изложение обоснований и методов, используемых при разработке инженерной части ДМ ОТН, и анализ полученных результатов. Задачи исследования:

- формализация методов координирования работы подразделений и производственных участков, оперативного прогнозирования и контроля производственной ситуации в единой структуре инженерной части ДМ ОТН;
- установление переменных инженерной части ДМ ОТН в виде логических и количественных соотношений параметров выполнения техпроцессов, параметров функционирования строительного про-

изводства, параметров ресурсного обеспечения, параметров оперативного управления;

- формализация связи инженерной части ДМ ОТН с ограничениями, а также с ключевыми соотношениями теоретической части ДМ ОТН;
- формализация метода функционирования инженерной части ДМ ОТН в основной период строительства в предприятии-подрядчике.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве методологической основы функционирования инженерной части ДМ ОТН в основной период строительства объекта предложен *единый метод информатизации* координирования, многофункционального оперативного прогнозирования, а также многоуровневого контроля хода решения текущих производственных задач различными подразделениями и производственными участками предприятия-подрядчика. Указанный метод реализуется специализированными средствами как обработкой оперативных значений производственных и организационных параметров текущих техпроцессов, функционированием приобъектного хозяйства, снабжением, так и специализированными средствами коммуникации (по параметрам техпроцессов) ключевых исполнителей. При этом информатизация управления и производства обеспечивается структурой и методами инженерной части ДМ ОТН. Методы ДМ ОТН, в свою очередь, включают алгоритмизацию и цифровизацию (автоматизацию) получения и обработки массивов текущих значений параметров обеспеченности и выполнения техпроцессов. Методы реализуем устанавливаемыми на предприятии правилами координирования, а также оперативного прогнозирования и контроля работы подразделений и участков в условиях меняющихся значений ограничений времени, накладываемых календарным графиком строительства.

Факторы, формирующие ОТН

С целью разработки ДМ ОТН к факторам, исследованным в работе [15], можно отнести и добавить следующие:

1. Инженерные формулировки определений, используемых терминов и понятий.
2. Определение ОТН как системы характеристик объекта капитального строительства (ОКС), строительного производства, организации и управления, технико-экономических параметров инвестиционного проекта (ИП).
3. Инженерные методы анализа производства, организации и управления, формирующие массивы их параметров, группируемых в характеристики ОТН.
4. Информационные технологии ДМ ОТН.

Основные определения ДМ ОТН

Принятое в статье определение теоретической модели ОТН как «детерминированная» требует, пре-

жде всего, использования при ее разработке и анализе инженерных формулировок определений терминов технологии, организации и управления строительным производством, а также соответствующих трактовок используемых научных понятий. Руководствуясь целью разработки ДМ ОТН, изложенной во введении, можно дать следующие определения:

1. Организационно-технологическую надежность строительства следует понимать как соотношение (меру соответствия) текущих значений: темпа выполнения текущих техпроцессов, готовых к расходованию ресурсов, текущих ограничений строительного производства, строительной готовности ОКС — плановым срокам, ресурсоемкости и сметной стоимости строительства.

2. Детерминированная модель ОТН строительства — цифровой расчетно-графический пользовательский интерфейс специализированного программного обеспечения (ПО) координирования решения текущих производственных и обеспечивающих задач на основе граничных условий сроков и ресурсоемкости строительного периода ИП. То есть ДМ ОТН — это интерфейс ПО, автоматизированно обрабатывающего логические и математические зависимости массива соотношений параметров проектных решений ОКС, параметров непрерывности и темпа выполнения технологических процессов в условиях текущей строительной готовности возводимого объекта, параметров организации и управления строительным производством и реализуемого техническими средствами коммуникации исполнителей.

Предложено принять в концепции ДМ ОТН, что ОТН — это переменная величина, рассчитываемая за период «объектового» управления в основной период строительно-монтажных работ (СМР). При этом период «объектового» управления — это формально принимаемый отрезок времени между точками контроля величины ОТН, соизмеримый с продолжительностью строительства, например 1 или 2 месяца, квартал и т.д. Период «объектового» управления также формально делится на несколько периодов «оперативного» управления, продолжительность которых может меняться в различных производственных обстоятельствах.

Таким образом, теоретическая ДМ ОТН включает в себя:

1. Систему (отношения) параметров запланированных результатов строительного периода ИП, параметров (готовности) ОКС и параметров организации и управления текущим строительным производством.

2. Виды математических зависимостей соотношений параметров, обоснованных (ниже) в инженерной части ДМ ОТН, а также форму представления ОТН как расчетной величины: математическую часть ДМ ОТН (теоретическую математическую модель).

3. Структурированные массивы значений актуальных параметров, а также их технико-экономических, организационных и управленческих расчетных

и логических соотношений из составов проекта организации строительства (ПОС), проекта производства работ (ППР), внутренних регламентов делового распорядка координирования решения ключевыми исполнителями подрядчиков производственных задач организации и управления: инженерную часть ДМ ОТН.

4. Алгоритмы автоматической обработки массивов параметров и их соотношений по теоретической математической модели, по расчетным алгоритмам частных задач организации производства, выполнения технологических процессов и управления ими, включая алгоритмы анализа текущих значений соотношений п. 1.

5. Наглядный интерфейс экранных форм ввода/автоматического вывода значений и соотношений параметров при формировании/анализе массивов (документации), обрабатываемых математической моделью.

Массивы параметров строительной готовности ОКС, производства, организации и управления, различные соотношения и группировки которых формируют характеристики системы ОТН, должны удовлетворять алгоритмическому координированию их соотношений по ДМ ОТН. Формулировка критерия алгоритмического координирования следующая: «своевременная готовность ресурса к расходованию в технологическом процессе, выполняемом в необходимом темпе в текущих проектных отметках строительной готовности объекта капитального строительства».

Практическая эксплуатация ДМ ОТН осуществляется, как сказано выше, с помощью специализированного ПО, разработанного на платформах доступных локальных, распределенных и мобильных телекоммуникаций сообразно производственным условиям решения задач исполнителями.

Система ОТН

В концепции ДМ ОТН к системе ОТН можно отнести «организационно-технологическую платформу строительства», описанную в исследовании [16]. Вместе с тем общая теория систем (ОТС), предложенная Л. Берталанфи в 30-х гг. XX в., рассматривает две основные проблемы теории систем [17]:

- первая основная проблема (*построение системы*): «Как при заданных целях и ограничениях построить (абстрактную) систему, которая успешно их удовлетворит?»;
- вторая основная проблема: «Как при заданном назначении системы управлять ею и модифицировать ее, чтобы получить динамическую устойчивость?».

Основываясь на приведенных формулировках проблем построения и управления системой, ОТС определяет систему следующим образом [18]:

Определение абстрактной системы S (*проблема построения системы*):

$$\exists S \subseteq \{X\} \times \{Y\}; \quad (\text{I})$$

(I) читается так: «Существует по крайней мере одна ($\exists$) система S как отношение любого рода ($\subseteq$) над декартовым произведением $\times$ двух множеств $\{X\}$ и $\{Y\}$, где $\{X\}$ — множество включаемых в систему параметров объекта и среды; $\{Y\}$ — множество включаемых в систему параметров результата взаимодействия объекта с внешней средой — выходных параметров системы». Декартово произведение $\times$ описывает полный набор парных отношений элементов множеств $\{X\}$ и $\{Y\}$.

Определение абстрактной системы S (проблема функционирования системы):

$$S : \{X\} \rightarrow \{Y\}; \quad (I')$$

(I') читается так: система S есть множество $\{Y\}$ параметров заданного результата как следствие ($\rightarrow$) взаимодействия различных параметров $\{X\}$ абстрактного объекта и внешней среды.

На основании (I) и (I') полное определение системы в символах ОТС будет иметь вид:

$$\begin{cases} \exists S \subseteq \{X\} \times \{Y\}; \\ S : \{X\} \rightarrow \{Y\}. \end{cases} \quad (I)$$

Таким образом, ОТН является, по сути, системой как отношений параметров элементов строительного производства (конкретизированный объект), параметров организации и управления им (внешней среды производства) и параметров строительной готовности ОКС (результат системы), так и следствием их взаимодействия. Если с помощью (I)–(I') описывать ОТН, то в (I) ОТН отражена символом $\subseteq$, а в (I') символом ($\rightarrow$). С системной точки зрения множество $\{X\}$ должно содержать набор фиксируемых в системе ОТН параметров выполнения технологических процессов, параметров потребности и расходования ресурсов строительного производства, через которые осуществляется его организация и управление им. Множество $\{Y\}$ должно содержать параметры строительной готовности в ресурсном исчислении, включая сроки (динамику ее приращения). Декартово произведение множеств $\{X\}$ и $\{Y\}$ устанавливает необходимые системе ОТН соотношения этих параметров, что требует инженерных правил их получения (инженерная часть системы ОТН, или, что тоже самое — инженерная часть ДМ ОТН, а также их использования, т.е. методов организации и управления производством (символ $\rightarrow$ в (I')), основанных на массиве значений принятого в системе ОТН декартового произведения. Указанные методы организации и управления (символ $\rightarrow$ в (I')) должны быть теоретически обоснованы. Следовательно, теоретическая база для выбора методов организации и управления для применения в условиях переменной ресурсной и технологической составляющей производства, меняющихся ограничений технологических процессов по срокам выполнения, имеющейся текущей динамики строительной готовности должна являться частью системы ОТН

и соответственно алгоритмическо-математической частью ДМ ОТН. Таким образом, описывая систему ОТН, в (I') следует заменить символ следствия ($\rightarrow$) на символ формальной логики «импликация» ($\Rightarrow$) («если... — то...»). Двойная стрелка говорит о том, что с точки зрения ДМ ОТН, кроме «экспертного», «случайного», или «вероятностного» использования методов организации и управления ($\rightarrow$), следует иметь и использовать теоретический механизм их выбора, в зависимости от текущей производственной ситуации, что соответствует:

$$S : \{X\} \Rightarrow \{Y\}. \quad (II)$$

Таким образом, представление ОТН как системы требует, в первую очередь, установления номенклатуры параметров производства, которыми оперируют методы организации и управления и которые определяют скорость приращения строительной готовности ОКС, а также соответствие текущих параметров производства итоговым требованиям ИП. К таковым относятся актуальные для ДМ ОТН:

- данные организационно-технологической документации и проектных решений ПД;
- параметры организации производства в основной период СМР и параметры «объектового» и оперативного управления производством;
- параметры организации выполнения текущих технологических процессов в проектных отметках сооружения;
- параметры организационных механизмов координирования коллективного решения производственных и обеспечивающих задач исполнителями, в том числе своевременность правового обеспечения строительства и обеспечения производства проектной документацией;
- параметры текущей строительной готовности ОКС;
- заданные параметры результатов ИП (вплоть до развития региона), также параметры ограничений самого региона.

Инженерная часть ДМ ОТН

Классификация методов моделирования на «научное» и «инженерное» выполнена в труде [19]. Подробно рассмотрены методы информационного моделирования технологий и бизнес-процессов в строительстве [20]. Инженерная часть ДМ ОТН обеспечивает оперативное управление производством выполнением технологических процессов в текущих проектных отметках ОКС, обоснованиями для краткосрочного прогнозирования и преодоления ограничений в непрерывности и темпе выполнения техпроцессов. Инженерная часть включает связанные с переменными теоретической математической модели ОТН структурированные массивы параметров состояния ресурсов, их соотношений, вне- и внутриплощадочных текущих ограничений выполнения технологических процессов, коммуникационные и расчетно-аналитические методы получения, обра-

ботки значений параметров технологических процессов, материального снабжения. Параметры ограничений, как правило, содержатся в организационно-технологических схемах возведения здания в целом (в составе ПОС), аналогичных схемах выполнения технологических процессов в локальных проектных отметках ОКС, предписаниях технического заказчика, параметрах сбой снабжения, взаимодействия подрядчиков, отсутствии проектных решений и прочем. Инженерная часть ДМ ОТН обеспечивает как обоснованный выбор методов организации и управления производством в оперативный период, реализуя автоматический расчет величины радиус-вектора точки текущей ОТН в координатах XYZ в ресурсных измерителях переменных математической модели, так и максимально эффективное координирование коллективного решения производственных задач отдельными участками строительства на основе инженерных расчетно-графических методов организации и управления с использованием их ПО, а также средств коммуникации данных и исполнителей. Расчетно-графическими методами ДМ ОТН обрабатывают актуальные соотношения параметров, группы которых перечислены в конце описания ОТН как системы. Все эти параметры, а также большинство их соотношений доступны для использования в ДМ ОТН и применяются в локальных расчетных задачах экономики, управления и организации, таких как разработка ПОС, ППР, технологических карт, составление и сдача нарядов, заявок на снабжение, заказов поставщикам, оформление товарно-транспортных накладных, проводка материалов по складу, поддержание норм запаса материалов на приобъектных складах, фиксация сменной выработки участков, таблицы учета рабочего времени, ведение оперативных графиков и составление расписаний, активирование объемов работ. Номенклатура, состав и порядок оборота указанных данных скоординированы требованиями финансового порядка и нормативными ограничениями деятельности, что на 90 % не позволяет использовать их для координирования решения текущих и подготовки решения ближайших задач. Можно сказать, что колоссальная трудоемкость документооборота обслуживает «прошедшее время» и в принципе не расходуется на координирование и краткосрочное прогнозирование решений оперативных задач. Таким образом, для реализации инженерной части ДМ ОТН, координирования производства и служб нужна разработка, прежде всего, алгоритмов и инженерных и производственных процедур реализации указанных алгоритмов с минимальной трудоемкостью. Кроме этого, следует провести адаптацию рабочего режима исполнителей к выполнению указанных процедур. Разработанные алгоритмы являются основой для применения подходящих или разработки специальных программно-технических средств их реализации. В табл. 1 показан пример формы документа, адаптирующей рабочий режим

исполнителей к жесткому координированию коллективного решения организационно и технологически связанных производственных задач.

Указанная форма является частью инженерной модели ДМ ОТН, обосновывающей структуру сети специализированных автоматизированных рабочих мест (АРМ), каждое из которых может быть переконфигурировано в случае изменения номенклатуры задач, делегированных исполнителю. Соответственно, в рабочем режиме решения производственных задач исполнителем на текущем этапе решения значения, присутствующие в задаче ресурсные параметры производства, организации и управления будут автоматически отбираться по алгоритмам ДМ ОТН посредством программного кода, зашитого в специализированное АРМ, и обновлять массив текущих значений параметров для расчета величины ОТН, а также для обеспечения математической модели свежими данными в случае необходимости выбора параметров организации и управления. Формулировки названий задач в первом столбце должны обеспечивать получение имеющихся в ДМ ОТН соотношений параметров состояния ресурсов, выполнения технологических процессов. Частично они пересекаются с известными задачами планирования и контроля. Формулировки в ячейках групп столбцов «цель и периодичность просмотра данных» устанавливают параметры координирования коллективного решения производственных задач и соответствующие им процедуры. Чем больше функционалов указано в столбце «просмотр данных», тем полнее координирование. Ячейки с серой заливкой показывают, что функционал не участвует в координировании решения задачи.

Что касается расчета величины ОТН методами инженерной части ДМ, т.е. расчета текущей величины радиус-вектора положения точки функции ОТН в фазовом пространстве, то он может быть выполнен простым расчетом средней величины *напряженности оперативного управления* за период «объектового управления» с применением коэффициента пропорциональности, приводящего к размерности ОТН в координатах XYZ. Согласно работе [21], величина напряженности оперативного управления может ежесекундно автоматически рассчитываться специализированным ПО по развернутому виду формулы (1) с одновременной визуализацией текущих вне- и внутриплощадочных, а также ресурсных ограничений выполнения техпроцессов на ОКС:

$$H_{\text{оп.проц}} = \delta_{\text{lim}} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{\delta_{(\text{vstat})i} \cdot \delta_{(\text{VT})i}}{\delta_{(\text{com})i}} \right), \quad (1)$$

где $H_{\text{оп.проц}}$ — напряженность оперативного управления текущими строительными процессами и их обеспечением; δ_{lim} — переменная текущих вне- и внутриплощадочных ограничений выполнения монтажно-укладочного технологического процесса; n — число ресурсов текущей потребности технологического процесса; δ_{Vstat} — переменная текущей заявленной

потребности технологического процесса в ресурсе; $\delta_{\text{ИТ}}$ — переменная своевременности выполнения текущего монтажно-укладочного процесса; $\delta_{\text{сов}}$ — переменная обеспеченности заявленной потребности.

При этом «напряженность оперативного управления выполнением в плановые сроки каждого строительного процесса и обеспечивающих мероприятий» интерпретируется как «характеристика эффективности организации производства», т.е. как «... мера соответствия: фактической обеспеченности ресурсами строительного процесса — текущей потребности, а также оперативных сроков работ — базовому календарному графику в условиях текущих вне- и внутривластных ограничений выполнения техпроцесса». Таким образом, текущая величина ОТН (величина радиус-вектора математической модели) может быть выражена через линейную зависимость от напряженности оперативного управления, что в принципе не противоречит данному ранее определению ДМ ОТН.

Информационные технологии ДМ ОТН

Информационные технологии в концепции ДМ ОТН содержат аналоговые (офлайн) технологии: правила, расчетно-графические методики решения задач установления текущей номенклатуры, объемов и своевременности подготовки и расходования ресурсов, алгоритмы методов управления строительным производством. Также информационные технологии включают техсредства оперативной телекоммуникации как данных производства и управления, так и исполнителей с рассредоточенных объектов, обеспеченные цифровым интерфейсом специализированного ПО их автоматизированной обработки и представления [22]. Доступные на рынке информационные технологии, наиболее известные из которых: «1С Подрядчик строительства. Управление строительным производством», «1С Управление строительной фирмой», «1С ERP. Управление строительной организацией», «БИТРИКС 24. Для подрядной строительной компании СТРОИТЕЛЬСТВО», «Альтис», «Bit. Строительство», продукты семейства MS Project, Spider, включая ERP продукты (среда ARIS), своим функционалом не обеспечивают требований инженерной части ДМ ОТН. Информационная технология [20] идеологически во многом отвечает требованиям инженерной части ДМ ОТН. Данных о разработке и внедрении корпоративных программ организации и оперативного управления строительным производством на 2025 г. авторами не выявлено. Как показывает практика:

1) для оперативного взаимодействия в строительном предприятии (СП) используют мобильную связь и локальные сети. Распределенная сеть интернет используется в основном для рассылки писем и периодических совещаний руководителей с исполнителями;

2) пакет MS Office широко применяют в строительных предприятиях и для разработки документов

для внешнего применения и для решения ряда задач «объектового управления» в основном для среднесрочного планирования или запаздывающей разнообразной отчетности в отделах;

3) информацию о состоянии производства руководители крупных предприятий получают с запаздыванием через финансовый (~85 % информации) и административный (~15 % информации) контроль, когда предотвратить негативное развитие производственной ситуации в полной мере уже сложно, а для предупреждения таких ситуаций нет методических и технических средств: только личный опыт и интуиция. Таким образом, с точки зрения ДМ ОТН:

- главной организационной задачей автоматизации (цифровизации) организации и управления является создание программно-методических средств, позволяющих ключевым исполнителям в ходе выполнения своих непосредственных обязанностей автоматически осуществлять коммуникационные и алгоритмические связи состояния производственных ресурсов и выполнения технологических процессов путем автоматической обработки текущих значений соотношений их параметров; обеспечение функционирования ИТ-технологии в соответствии с установленным в предприятии деловым распорядком.

Основные функциональные задачи применения информационных технологий:

- реализация аналитической проверяемости достоверности темпа (значений параметров) выполнения процессов, скоординированного с готовностью ресурсов к расходованию в оперативный период управления;
- обеспечение автоматического анализа и представления результатов обработки данных оперативного управления.

Ключевыми технологическими задачами разработки и функционирования ИТ-технологий в структуре ДМ ОТН являются установление структур массивов данных и архитектуры их хранения (выбор архитектуры приложений), обеспечивающих заданный эффективный интерфейс форм ввода данных, разработка эффективных для пользователей (исполнителей организации и управления) экранных форм вывода результатов аналитической обработки массивов данных.

Основными эксплуатационными характеристиками ИТ-технологий организации производства и оперативного управления в структуре ДМ ОТН принимаются:

- возможность перенастраивать функционал автоматизированных рабочих мест пользователей под требования предприятия (конфигурирование АРМ);
- наглядность интерфейса;
- безотказность технологии, обеспечиваемая минимальной загрузкой оперативной памяти компьютеров;

- доступность структуры хранения сведений для корректировок данных вручную ответственными пользователями квалификации инженер-строитель;
- снижение объема данных, вводимых в коммуникационную сеть специализированного ПО в ходе оперативного управления, снижение трудоемкости ввода данных на 40–75 %, повышение скорости коммуникации и обновления информации;
- простота и скорость доступа к данным;
- «гибкость» интерфейса и структуры хранения данных (работоспособность в измененных режимах функционирования);
- интегрируемость с обязательными или другими широко используемыми программами;
- сохранение конфиденциальности данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основные определения ДМ ОН

Полученные в статье основные определения ДМ ОН позволили описать систему ОН строительства методами общей теории систем и теории множеств.

Система ОН

Полученные на основе выполненных определений символьные выражения (I), (I') и (II) описания системы ОН дали возможность установить структуру массивов актуальных параметров организации производства, выполнения технологических процессов, управления строительным производством, строительной готовности ОКС для решения задачи обоснования их соотношений в ДМ ОН. Указанные соотношения служат параметрами переменных математической части и одновременно параметрами инженерной части ДМ ОН. Установлено, что значения параметров ДМ ОН определяются через значения параметров текущего состояния ресурсов и технологических процессов.

Полученное в статье выражение (II) в явном виде показывает влияние параметров организационно-технологической надежности на выбор методов организации и управления строительным производством, что имеет следствием эффективное приращение строительной готовности ОКС.

Инженерная часть ДМ ОН

1. Методы координирования работы подразделений и производственных участков, оперативного прогнозирования и многоуровневого контроля производственной ситуации формализованы в виде принципиального решения структуры (табл. 1) и в корпоративных, или в нормативных формулировках в ячейках табл. 1.

2. Учитывая, что инженерная часть ДМ ОН построена и функционирует на основе значений параметров выполнения техпроцессов и их обеспечения как «до», так и «в текущий момент», или в «кратко-

срочно-прогнозный период», основными переменными инженерной части ДМ ОН можно выделить:

1) фактически проведенный объем конструкций/работ в составе техпроцесса, выраженный соотношением измерителей израсходованных трудовых и материальных ресурсов, которое, в свою очередь, обосновывается в теоретической части ДМ ОН;

2) текущее отставание/опережение выполнения техпроцесса от календарного графика;

3) действующие в текущий момент вне- и внутриплощадочные ограничения выполнения техпроцессов и их ресурсного обеспечения, выраженные в виде номенклатуры безразмерных численных величин, разрабатываемых в рамках инженерной части ДМ ОН на основе следующих представлений:

- текущее «виртуальное» состояние производственного ресурса до начала его переработки в строительную продукцию и меняющее свое логическое значение в следующем порядке: «предусмотрен проектом» → «затребован производственным участком» → «направлен поставщику» → «получен счет на оплату» → «оплачен» → «готов к расходованию (доступен)» → «уложен в дело (списан по бухгалтерии/работа оплачена)». Указанным «виртуальным» состояниям соответствуют величины численного безразмерного идентификатора состояния (логического счетчика), устанавливаемые инженерной частью ДМ ОН;

- текущие соотношения «виртуальных» состояний трудовых, материальных и технических ресурсов в ходе выполнения техпроцесса;

- текущее соотношение темпа осуществления техпроцессов (фактическая сменность, численный состав, сменная выработка в натуральных измерителях) и оставшейся продолжительности их выполнения по графику.

Ранее приведенное выражение (1) входит как переменная в ключевое соотношение инженерной части ДМ ОН в текущий период СМР.

3. На основе результатов, полученных в п. 2, ключевое соотношение переменных теоретической части ДМ ОН может быть представлено в виде непрерывной аналитической функции трех переменных:

$$W_{\text{ОН}} = f_m^n(\vec{R}, \vartheta, \varphi),$$

где $W_{\text{ОН}}$ — организационно-технологическая надежность строительства в текущий оперативный период. Может принимать как положительные, так и отрицательные значения; n, m — численные параметры, характеризующие число задействованных групп алгоритмов решения текущих производственных и управленческих задач, определяемые на основе анализа системы ОН предприятия (I) (I') и табл. 1; $\vec{R}$ — радиус-вектор в сферической системе координат $0, R, \varphi, \vartheta$. Величина R характеризует текущую строительную готовность объекта. R имеет измеритель в виде приведенного к ДМ ОН соотношения физического измерителя готовых конструкций

Табл. 1. Вариант штатной схемы координирования хода решения задач предприятия
Table 1. A variant of the standard scheme for coordinating enterprise tasks

–	Исполнитель 1 (ФИО) Executor 1 (First name)	Исполнитель 2 (ФИО) Executor 2 (First name)	–						
Номер / Number	Формы результата и периодичность просмотра Result forms and viewing frequency								
	Периодичность ввода данных в сеть Frequency of data entry into the LAN	Координирование задач (просмотр данных/корректировка) Task Coordination (Data Review)	Ввод данных по ходу решения задачи Data entry in the course of solving a problem						
	Задачи информационного обеспечения оперативного управления строительным предприятием Tasks of information support for the operational management of a construction company								
1. Подготовка строительных работ (договора подряда) / Preparation of construction works (contract agreement)									
1	Составление плановой комплекточной ведомости объекта Preparation of specifications for building resources	Инженер № 2 ПТО Engineer No. 2 of PTD	Прораб, главный инженер, начальник участка, начальник ПТО The foreman, Chief Engineer, the head of the site, Head of PTD, etc.	По распоряжению начальника ПТО By order of Head of PTD	Дополнение или исключение позиций. Каждые 40 позиций Adding or excluding items. Every 40 positions	Ведение рейтинга, выравнивание нагрузки исполнителя, ежедневно Rating management, monitoring/load balancing of the performer, every day	Ведение рейтинга востребованности по завершении технологии Maintaining the technology demand rating, upon completion	–	*

Продолжение табл. 1 / Continuation of the Table 1

2	Составление плановой калькуляции стоимости материально- технических ресурсов с уточнением поставщиков и особенностей поставок Drawing up a planned calculation of the cost of material resources with clarification of suppliers and supply specifics	Снабженец № 3 Provider No. 3	Начальник снабжения, руководитель объекта Head of PD, head of the object. etc.	Одновременно с инженером № 2 ПТО At the same time as the engineer No. 2 PTD	–	–	–	Ведение рейтинга, выравнивание нагрузки исполнителя, ежедневно Rating management, monitoring/loadbalancing of the performer, every day	*
3	Составление (импорт из ПОС, ППР) объектного базового графика производства работ Drawing up (import from POS, PPR) an object-based basic schedule of work	Инженер № 1 ПТО Engineer No. 1 of PTD	Прораб, руководитель объекта, снабженец The foreman, Head of the object, provider, etc.	Одновременно с инженером № 2 ПТО At the same time as the engineer No. 2 PTD	Дополнение или исключение позиций. Каждые 40 позиций Adding or excluding items. Every 40 positions	Ведение рейтинга, выравнивание нагрузки исполнителя, ежедневно Rating management, monitoring/load balancing of the performer, every day	Прогнозирование нагрузки на ресурсную базу, по завершении Forecasting the need for technical tools, upon completion	Прогнозирование загруженности службы снабжения, по завершении Forecasting the workload of the logistics service, upon completion	*

и т.д. / etc.

2. Текущее строительное производство / Weaving construction industry									
14	Сводный оперативный график СМР и материального снабжения незавершенных объектов по фирме Operational schedule of work and logistical support for unfinished facilities	Автоматический Automatic	Руководитель проекта, снабженец, начальник ПТО, главный инженер, начальник снабжения и т.д. Head of the object, provider, Head of PTD, Chief Engineer, Head of PD etc.	Ежедневно Every day	–	Распоряжения по подготовке исполнительной документации, 2 раза в месяц Orders for the preparation of executive documentation, 2 times a month	Распоряжения по подготовке строительной техники, 3 раза в неделю Orders on the readiness of construction equipment, 3 times a week	Распоряжения по координированию снабжения с производством, 2 раза в неделю Orders for coordinating supply with production, 2 times a week	*

Продолжение табл. 1 / Continuation of the Table 1

2. Текущее строительное производство / Weaving construction industry									
15	Своевременность поставок материально-технических ресурсов на объект(ы) Timely delivery of material and technical resources to the facility(s)	Автоматический Automatic	Руководитель проекта, снабженец, начальник снабжения и т.д. Head of the object, Head of provider, provider etc.	2 раза в неделю 2 times a week	Обеспечение непрерывности строительства, 3 раза в неделю Ensuring the continuity of the construction, a 3 times a week	–	–	Предотвращение задержек доставки, 3 раза в неделю Preventing delivery delays, 3 times a week	*
16	Формирование оперативных заявок производства снабжению Formation of operational object requests for the production and supply of materials and equipment	Инженер № 1 ПТО Engineer No. 2 of PTD	Прораб, снабженец, руководитель объекта, начальник снабжения и т.д. The foreman, provider, Head of the object, Head of PD, etc.	2 раза в неделю 2 times a week	Дополнение или исключение позиций. Adding or excluding items, 1 time a week	–	–	Выравнивание нагрузки на снабжение, 1 раз в неделю Balancing the load of the logistics supply service, 1 time a week	*
17	Ведение протокола персональных затрат и условий труда рабочих и производственных обстоятельств Maintaining personal records of the tension and working hours of employees and production circumstances	Бригадир Brigade leader	Начальник участка, прораб, мастер и т.д. Master, the head of the site, the foreman, etc.	Ежедневно Every day	Подтверждение производственных условий, каждый день Clarification of production conditions and circumstances, every day	–	Подтверждение/корректировка производственных условий, 2 раза в неделю Confirmation/adjustment of production conditions, 2 times a week	–	*

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

2. Текущее строительное производство / Weaving construction industry									
18	Ведение протокола суточной трудоемкости выполнения процессов субподрядчиками и производственных обстоятельств Maintaining a protocol of the daily labor intensity of subcontractors' processes and production circumstances	Прораб The foreman	Руководитель объекта, главный инженер, начальник ПТО и т.д. Head of PTD, Chief Engineer, etc.	Ежедневно Every day	Контроль выполнения графика, каждый день Schedule execution control, every day	Контроль выполнения графика, 2 раза в неделю Schedule execution control, 2 times a week	Контроль выполнения договора, 2 раза в месяц Control over the fulfillment of the contract, 2 times a month	–	*
и т.д. / etc.									
3. Поддержание автоматизированной системы организации и управления / Maintaining the organization and management system									
33	Работа с файлом конфигуратора для автоматического коллективного отображения оперативных данных исполнителям Working with the configurator file for automatic collective display of operational data to performers	Автоматический Automatic	*	*	*	*	*	*	*
и т.д. / etc.									
4. Обеспечение оперативного управления производственной деятельностью / Ensuring operational management of production activities									
41	Оперативный журнал хода коллективного решения задач и загрузки исполнителей Operational log of the progress of collective task solving and workload of performers	Автоматический Automatic	*	*	*	*	*	*	*
и т.д. / etc.									

и/или измерителя израсходованных ресурсов. R характеризует положительное ($\sin\varphi > 0$) и отрицательное (устранение брака, переделки ($\sin\varphi < 0$)) приращение строительной готовности объекта как при отставании, так и при опережении графика. Величина (модуль) R определяется как векторное произведение двух компланарных векторов: текущей технологической, а также организационно-управленческой обеспеченности строительного производства, лежащих в плоскости, угол наклона которой к плоскости $Y=0$ прямоугольной системы координат определяется углом ϑ (см. далее). В указанной плоскости (на схеме на рисунке это плоскость рисунка) отображена модифицированная диаграмма Ганта, согласно которой протекают во времени технологические и обеспечивающие процессы. В параллельных плоскостях, согласно рисунку, происходят импульсные управленческие процедуры преобразований «виртуальных» состояний ресурсов по алгоритмам методов управления. Интенсивность этих процедур в оперативный период характеризуется модулями компланарных векторов, а их согласованность (скоординированность величин параметров организации, управления и производства) — величиной угла φ между векторами; φ — угол между компланарными векторами. Величина φ характеризует текущее рассогласование параметров производства и параметров управления. Величина угла φ определена на интервале $-\pi/2$ (максимальная напряженность системы организации и управления), $+\pi/2$ (снижение фактической напряженности от принятой на предприятии нормативной величины) и пропорциональна текущей величине напряженности оперативного управления (1); ϑ — угол между радиус-вектором R и осью Z прямоугольной системы координат XOY . Величина ϑ характеризует текущее рассогласование сроков выполнения актуальных техпроцессов с требованием календарного графика. Величина угла ϑ определена на интервале $-\pi/2$ (срыв сроков), $+\pi/2$ (опережение графика на несколько оперативных периодов).

Описанная в статье инженерная часть ДМ ОТН позволяет:

1. Формировать и постепенно дорабатывать структурированный массив данных, который, согласно стандарту¹, явится составной частью информационной модели о состоянии ОКС в строительный период ИП. При строительстве в условиях Арктического региона указанный массив дополняется актуальными параметрами района строительства, обосновывающими разработку организационно-технологических схем строительства в дополнение к применению сметных коэффициентов.

2. В оперативный период СМР позволяет:

- координировать коллективное решение исполнителями технологически и организационно связанных текущих и предстоящих производственных задач;

- устанавливать параметры организации и управления строительным производством;

- регулировать значения и соотношения параметров организации и управления строительным производством в зависимости от соотношения темпа проведения технологических процессов, соотношения израсходованных/готовых к расходованию материально-технических ресурсов и скорости приращения строительной готовности ОКС по критерию выполнения граничных условий сроков, расходования ресурсов этапа, или всего строительного периода ИП.

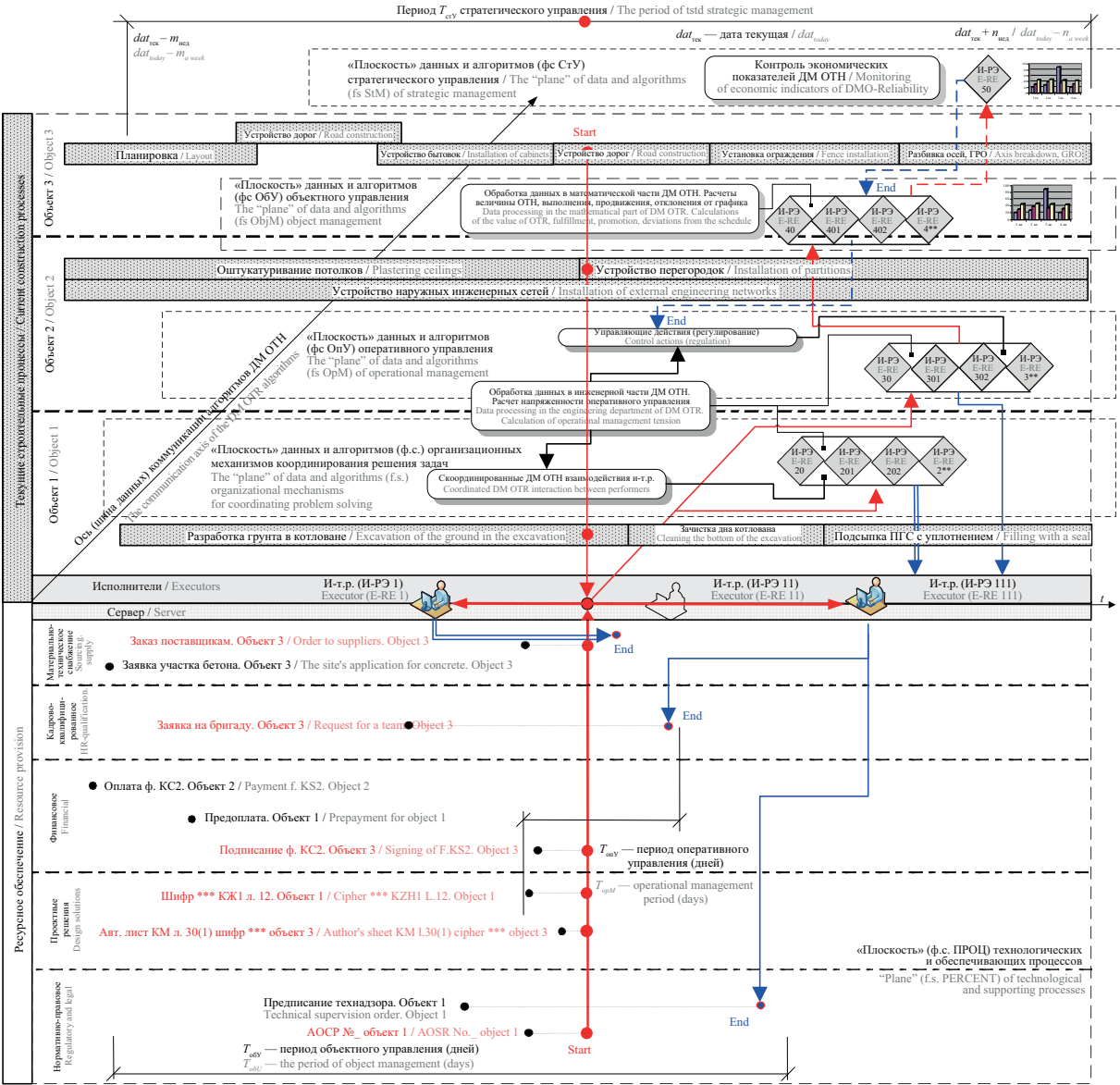
Имитационная модель (ИМ) функционирования инженерной части ДМ ОТН представлена на рисунке.

Пространство перед плоскостью рисунка — материальное физическое пространство (МП), которое содержит материальные результаты выполнения процессов. Пространство за рисунком — это информационное пространство (ИП), которое содержит данные выполнения процессов, а также алгоритмы из обработки по ДМ ОТН. Плоскость рисунка — это граница раздела ИП и МП. На этой плоскости (на границе раздела МП и ИП) вдоль оси времени t протекают все технологические процессы, выполняются процедуры организации и управления. Если обратиться к изображению функции ОТН, то полусфера ниже плоскости XOY находится в МП результатов выполнения процедур, а верхняя — в ИП, причем каждой точке МП соответствует точка в ИП комплексно-сопряженная с ней относительно границы раздела (плоскости рисунка/процессов на рисунке). По методам решения задач организации и управления информационное пространство структурировано рядом поверхностей (изображены для упрощения плоскими, хотя, согласно математической части ДМ ОТН, они являются сферическими сегментами) данных и алгоритмов следующих «функциональных» систем: организация механизмов координирования решения текущих производственных задач (ф.с. ОМ), оперативного управления (ф.с. ОпУ), объектового (ф.с. ОбУ) и стратегического (ф.с. СтУ) управления. Ось коммуникации (обмена данными) между «функциональными» системами направлена в ИП перпендикулярно рисунку и оси времени. Исполнительно-решающими элементами ДМ ОТН являются информационно-технические ресурсы (и-т.р.), алгоритмы обработки данных и технические средства их реализации. В плоскости рисунка над осью времени t показана диаграмма Ганта текущих технологических процессов на трех объектах инвестиционного проекта. В нижней части — диаграмма реализации ресурсного обеспечения строительства в периоды объектового и оперативного управления. Надписи **Start** обозначают начальный момент обмена информацией. Надписи **End** — реализацию реше-

¹ ГОСТ Р 57563–2017/ISO/TS 12911:2012. Моделирование информационное в строительстве // Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. 2017. 27 с.

ния производственной задачи как следствие обмена информацией. Сплошные стрелки обозначают взаимодействия — реакцию системы по алгоритмам ДМ ОТН с фиксацией исполнителя. Пунктирные синие стрелки, соответственно, взаимодействия — реакции функциональных систем не по алгоритмам ДМ ОТН.

Сервер непрерывно восприимчив к изменению информации, и-т.р. — дискретно. Информация, передаваемая/получаемая И-РЭ, структурирована и форматирована под алгоритмы автоматической обработки по ДМ ОТН. Данные содержат только параметры и их значения, а также ограничения выполнения тех-



Примечание: интерфейс ИМ, приведенный на рисунке, подобен интерфейсу линейной диаграммы Ганта с расширенным функционалом, обеспечиваемым ДМ ОТН:

- момент обмена между функциональными системами и исполнительно-решающими элементами (И-РЭ) введенной в систему (сеть) информации;
- моменты обмена информацией в прошедшие периоды оперативного управления.

Note: The IM interface shown in the figure is similar to that of a linear Gantt chart, with extended functionality provided by the DM OTR:

- the exchange of information introduced into the system (network) between functional systems and executive-decision-making elements (EDE);
- the points at which information was exchanged during previous operational management periods.

Имитационная модель функционирования инженерной части ДМ ОТН
Simulation model of the functioning of the engineering part of the DM OTR

нологических процессов и их обеспечения и пояснения к ним: причины, (вероятные) последствия.

Увеличение текущей напряженности оперативно-го управления, величина которой регулярно рассчитывается в инженерной части ДМ ОТН в течение периода оперативного управления автоматически запускает либо алгоритмизированные процедуры оргмеханизмов координирования решения задач исполнителями, либо офлайн регулирующие воздействия в ф.с. ОпУ.

Уменьшение относительно принятой нормы, величины текущей ОТН, рассчитываемой в математической части ДМ ОТН, сигнализирует о необходимости принятия решений объектового уровня ответственности (условий договора). Интерпретация значений параметров текущих техпроцессов, производства, обеспечения, организации и управления, определивших актуальную величину ОТН, позволяет либо быстро спрогнозировать опасную тенденцию, либо обосновать содержание и своевременно выдать указания в ф.с. ОпУ. Анализ динамики изменений величины ОТН за период стратегического управления также позволяет по необходимости своевременно внести изменения на уровне управления объектом строительства.

Практическая задача расчетов по ИМ ДМ ОТН заключается в том, чтобы:

- установить максимально допустимую продолжительность временных интервалов как неактивности И-РЭ, так и продолжительности периодов оперативного $T_{опу}$, объектового $T_{обу}$ и стратегического $T_{сту}$ управления;
 - установить через производительность информационных технологий ДМ ОТН и через распределение задач организации и управления необходимое число и-т.р. при допустимых пределах изменения производственной нагрузки исполнителей в оперативный период;
 - определить число и структуру И-РЭ: исполнителей, алгоритмы и технические средства ДМ ОТН.
- Таким образом, метод функционирования инженерной части ДМ ОТН на предприятии-подрядчике в оперативный период выполнения СМР формализован в виде модифицированной трехмерной диаграммы Ганта (рис.). Диаграмма отображает:
- координирующие связи коммуникации ключевых исполнителей;
 - ход выполнения техпроцессов на участках;

Табл. 2. Сравнение платформ разработки специализированного программного обеспечения по основным показателям эффективности эксплуатации

Table 2. Comparison of platforms for developing specialized software

Эксплуатационное требование Operational requirement	Платформа автоматизации Automation platform		
	MS Excel (OLE) (файл-сервер) MS Excel (OLE) (file server)	Реляционные и локальные базы данных (БД) (файл-сервер) Relational and local DB (file server)	MS SQL, ORACL, реляционные БД (клиент-сервер) MS SQL, ORACL, relational DB (client-server)
Понятный доступ к архитектуре хранения данных Clear access to data storage architecture	++	+/-	--
Автозаполнение форм ввода данными аналогов до 75 % Autofill of input forms with analog data up to 75 %	++	+/-	--
Устойчивость в штатных режимах Stability in normal operating conditions	++	+/-	-
Скорость доступа к данным Data access speed	+/-	+	++
Конфиденциальность данных Data privacy	++	+/-	--
Универсальность (конфигурируемость) Versatility (configurability)	+	+/-	+/-
Устойчивость в нештатных режимах работы Stability in abnormal operating conditions	+	-	-
Интегрируемость с другими пакетами ПО Integration with other software packages	+/-	+/-	+/-
Низкая стоимость разработки и эксплуатации Low development and operating costs	+	+/-	--
Отсутствие системного администрирования Lack of system administration	+	-	-

- «виртуальные» состояния ресурсов, необходимых для выполнения техпроцессов в оперативный период;

- работу, а также технические средства информатизации различных подразделений.

При этом для функционирования инженерной части ДМ ОТН необходима как разработка теоретической части ДМ ОТН (аналитических соотношений переменных модели), так и специализированного ПО, реализующего:

- теоретическую часть ДМ ОТН в алгоритмах автоматизированных рабочих мест ключевых исполнителей;

- функционирование сети АРМ по правилам табл. 1 в соответствии с диаграммой Ганта (рис.) на основе указанных в статье, или иных рациональных платформ.

Представляется очевидным, что максимальная эффективность применения инженерной части ДМ ОТН обеспечивается в равной степени алгоритмизацией как математического аппарата теоретической части ДМ ОТН, так и алгоритмизацией и автоматизацией методов (табл. 1) инженерной части ДМ ОТН. Поэтому необходимо разрабатывать обе части ДМ ОТН, не допуская их методического разрыва. Вместе с тем следует отметить, что эксплуатация инженерной части ДМ ОТН неосуществима без:

- воли руководства;
- понимания последним получаемых преимуществ от подхода к организации и управлению строительным производством на основе ДМ ОТН;
- специализированного ПО и сети АРМ.

Информационные технологии ДМ ОТН

В результате сравнительного анализа различных платформ автоматизации на основе указанных ранее задач автоматизации организации и управления, а также принимая во внимание: небольшой объем и низкую скорость оборота данных (по сравнению с задачами «склад», или «торговля»), необходимых незначительному числу пользователей АРМ для решения оперативного управления и организации; различие обработки данных алгоритмами оперативного и объектового управления; наличие в большинстве предприятий локальной вычислительной сети (ЛВС), востребованной для задач организации и управления как средство коммуникации и хранения данных, а не как мощный сервер высокоскоростной обработки больших массивов данных; отсутствие необходимости системного администратора для обслуживания ЛВС; ограниченное использование технологий искусственного интеллекта при решении локальных задач, обоснованное в рамках ДМ ОТН, наиболее подходящей платформой автоматизации организации и управления строительным производством является платформа специализированного ПО архитектуры «файл-сервер» на основе OLE автоматизации серверов (аналогов) MS Excel и MS Word с интеграцией программ-аналогов MS Project и с использованием выгрузок 1С***.

Сравнение эксплуатационных характеристик платформ разработки специализированного ПО организации и управления строительством приведено в табл. 2.

Табл. 2 показывает, что наиболее перспективной платформой разработки специализированного (корпоративного) ПО организации и управления, удовлетворяющей требованиям ДМ ОТН, является платформа автоматизации в архитектуре «файл – сервер» аналога сервера MS Excel.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в виде табл. 1 и схемы (рис.) формализации методов координирования работы подразделений и производственных участков, оперативного прогнозирования и многоуровневого контроля производственной ситуации и доработанные «под себя» предприятием являются методами установления правил получения данных о состоянии и тенденциях текущего производства, основанием для автоматизации (разработки, адаптации ПО) информатизации производства и управления предприятия, а также для установления сроков принятия решений ключевыми сотрудниками предприятия. На основании детализированных под конкретное предприятие (табл. 1 и рис.), а также аналитических зависимостей в составе инженерной и теоретической частей ДМ ОТН IT-специалисты программируют алгоритмы, разрабатывают интерфейсы и структуру сети автоматизированных рабочих мест ключевых сотрудников предприятия. Выполнение указанных мероприятий обеспечит построение на предприятии единой структуры инженерной части ДМ ОТН, функционирующей в режиме принятия оперативных решений.

Основная часть работы управления по организации строительных техпроцессов осуществляется до начала их календарных сроков способами преобразования службами предприятия «виртуальных» состояний ресурсов. Координирование хода решения текущих задач и завершения в срок начатых производством техпроцессов, а также краткосрочное прогнозирование и оперативное регулирование производственной ситуации также основаны на результатах комплексного анализа предстоящих «виртуальных» преобразований состояний ресурсов с целью выработки оптимальных для предприятия методов их реализации.

Полученное в исследовании ключевое соотношение переменных теоретической части ДМ ОТН применимо и в период проектной подготовки, а также в периоды подготовки и реализации инвестиционных решений при замене параметрами проектирования и инвестирования параметров строительного производства, а также их соотношений в теоретической части ДМ ОТН.

Для успешного решения задачи развития Арктического региона, поставленной перед строительной наукой и промышленностью, одним из ключевых факторов служит порядок поэтапного ввода в эксплуатацию рассредоточенных на значительном уда-

лении объектов экономики. Указанный порядок обуславливает распределение и порядок задействования строительных ресурсов на подготовку и выполнение строительных работ по устройству коммуникационных путей, возведению обеспечивающих промышленных предприятий расчетной мощности с необходимой социальной инфраструктурой. В этом случае к массивам параметров инженерной части ДМ ОТН строительства добавляется массив параметров региона, а сама ДМ ОТН не претерпевает изменений. Это говорит о том, что ДМ ОТН не является «замкнутой» и должна пополняться согласованными массивами параметров и алгоритмами их обработки. Формирование структурированного массива параметров организации и управления ходом выполнения строительных работ, координируемого по времени и по распределению строительных ресурсов со сроками ввода объектов и коммуникационных сетей в эксплуатацию, его автоматизированная регулярная обработка ключевыми участниками осуществимы с помощью специальных программно-телекоммуникационных комплексов, основанные принципы разработки которых описаны, предложены и проанализированы в статье. Информационная технология, обеспечивающая координирование реализации про-

граммы развития региона на основе оперативных данных хода возведения локальных объектов капитального строительства, основанная на ДМ ОТН является инструментом организации и управления, а также решающим фактором эффективности практического применения модели. Разработка подобного инструмента оценивается авторами как перспективная среднесрочная, комплексная, выполняемая специалистами различных специальностей: технологии возведения зданий и сооружений, организации строительного производства, управления строительным производством, управления производственной деятельностью предприятия, а также IT-специалистами. Она требует достаточного уровня понимания IT-специалистами теоретической и инженерной частей ДМ ОТН, а специалистами-строителями дополнительно к пониманию указанной модели умения описывать ДМ ОТН на уровне технических заданий разработчикам специализированного ПО. В случае успешного решения проблемы ДМ ОТН представляется целесообразным включать отдельные ее положения в пункты раздела 7 «Проект организации строительства» проектной документации, а также в иную организационно-технологическую и договорную документацию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Перов Ф.В., Мангушев Р.А., Дацюк Т.А., Болотин С.А. История и перспективы развития малоэтажной деревянной застройки городов севера России // Жилищное строительство. 2024. № 1–2. С. 51–57. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-1-2-51-57. EDN DDUIKH.
2. Болотин С.А. Формирование графика комплексной застройки территории с использованием Revit и Microsoft Project // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры : мат. II Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 53–58. DOI: 10.23968/BIMAC.2019.009. EDN MAHDFI.
3. Гусаков А.А., Гинзбург А.В., Веремеенко С.А., Монфред Ю.Б., Прыкин Б.В., Яровенко С.М. Организационно-технологическая надежность строительства. М. : А/О «Внешторгиздат», 1994. 472 с. EDN TOCFEF.
4. Михальченко О.Ю. Организационная надежность планирования строительства объектов : дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2012. 150 с. EDN QFXDWZ.
5. Легостаева О.А. Совершенствование организационно-технологической надежности строительных процессов в инженерных проектах : дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2007. 203 с. EDN QDXMTV.
6. Абдуллаев Г.И., Величкин В.З., Солдатенко Т.Н. Повышение организационно-технологической надежности строительства линейно-протяженных сооружений методом прогнозирования отказов // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 3 (38). С. 43–50. DOI: 10.5862/MCE.38.6. EDN PZETTH.
7. Керимов Ф.Ю. Повышение организационно-технологической надежности подготовки строительного производства в условиях снижения ресурсного обеспечения : дисс. ... д-ра техн. наук. М., 2005. 356 с.
8. Кузнецов П.А. Организационно-технологическая надежность ресурсного обеспечения строительного переустройства аварийных объектов : дисс. ... д-ра техн. наук. М., 2006. 426 с. EDN NOGKCT.
9. Недавий О.И., Базилевич С.В., Кузнецов С.М. Оценка организационно-технологической надежности строительства объектов // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 2 (18). С. 137–141. EDN RTJHNZ.
10. Кузнецов С.М., Маслов И.А., Суворов А.Д., Ячменьков С.Н. Оценка надежности организационно-технологических решений в строительстве // Транспортное строительство. 2007. № 1. С. 26–27. EDN UWZCGJ.
11. Гуреев К.А., Соловьёв В.К. Итоговая комплексная оценка рисков строительства нового объекта // Региональная и отраслевая экономика. 2023. № 3. С. 136–142. DOI: 10.47576/2949-1916_2023_3_136. EDN JAEIHY.
12. Grabovyy P., Sezemin D. Совокупный риск при реализации крупного комплексного проекта строительства атомной электростанции // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2023. Т. 19. № 4. С. 38–47. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-4-38-47. EDN UPCJRZ.
13. Руденко А.А. Обеспечение строительства ресурсами как элемент его организационно-техно-

логической надежности // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. 2023. Т. 2. № 1 (51). С. 130–139. DOI: 10.51965/2076-7919_2023_2_1_130. EDN MAFCQN.

14. Ланидус А.А., Мотылев Р.В., Сокольников В.В. Формирование методологии детерминированной модели организации строительного производства на основе концепции организационно-технологической платформы строительства // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 1. С. 116–131. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.116-131. EDN IDDMFY.

15. Бурчик В.В., Кузьмич Н.П. Исследование факторов, влияющих на качество и организационно-технологическую надежность строительства // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. 2023. № 1. С. 45–49. DOI: 10.56584/1560-8816-2023-1-45-49. EDN DADLVE.

16. 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.

17. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. М. : Радио и связь, 1991. 222 с.

18. Месарович М., Марко Д., Такахара Я. Теория иерархических многоуровневых систем. М. : Мир, 1973. 342 с.

19. Сокольников В.В. Проблема определений и классификации теоретических моделей организации, проектной подготовки и технологии строительства // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 11. С. 1564–1573. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1564-1573. EDN EWIWUJ.

20. Теличенко В.И., Ланидус А.А., Морозенко А.А. Информационное моделирование технологий и бизнес-процессов в строительстве. М. : Издательство АСВ, 2008. 144 с. EDN SAPKVZ.

21. Сокольников В.В., Молодцов М.В. Информатизация организации строительного производства и оперативного управления // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 6. С. 1006–1015. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.1006-1015. EDN PDGGHG.

22. Marcon P., Zezulka F., Vesely I., Szabo Z., Roubal Z., Sajdl O. et al. Communication Technology for Industry 4.0 // 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium — Spring (PIERS). 2017. Pp. 1694–1697. DOI: 10.1109/piers.2017.8262021

Поступила в редакцию 20 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 13 мая 2026 г.

Одобрена для публикации 15 мая 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Роман Владимирович Мотылев** — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой организации строительства; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 19176755, Scopus: 57223004399, ResearcherID: 4712-708, ORCID: 0000-0002-2026-0390; motylev@yandex.ru;

Владимир Вячеславович Сокольников — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций, зданий и сооружений; **Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС)**; 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 9; РИНЦ ID: 526448, Scopus: 57202821958, ResearcherID: ABA-8338-2021, ORCID: 0000-0003-3768-2079; vschief@yandex.ru.

Вклад авторов:

Мотылев Р.В. — концепция исследования, развитие методологии, идея, написание статьи.

Сокольников В.В. — идея, сбор и обработка материала, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Perov F.V., Mangushev R.A., Dacjuk T.A., Bolotin S.A. History and prospects of development of low-rise wooden buildings in cities of the north of Russia. *Housing Construction*. 2024; 1-2:51-57. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-1-2-51-57. EDN DDUIKH. (rus.).

2. Bolotin S.A. Scheduling of complex development using Revit and Microsoft Project. *BIM Modeling in Construction and Architecture : Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference*. 2019; 53-58. DOI: 10.23968/BIMAC.2019.009. EDN MAHDFI. (rus.).

3. Gusakov A.A., Ginzburg A.V., Veremeyenko S.A., Monfred Yu.B., Prykin B.V., Yarovenko S.M. *Organizational and technological reliability of construction*. Moscow, JSC “Vneshtorgizdat”, 1994; 472. EDN TOCFEF. (rus.).

4. Mikhilchenko O.Yu. *Organizational reliability of planning the construction of facilities : diss. ... candidate of technical sciences*. Novosibirsk, 2012; 150. EDN QFXDWZ. (rus.).

5. Legostaeva O.A. *Improvement of organizational and technological reliability of construction processes in engineering projects : diss. ... cand. of technical sciences*. Novosibirsk, 2007; 203. EDN QDXMTV. (rus.).

6. Abdullaev G.I., Velichkin V.Z., Soldatenko T.N. Increasing the organizational and technological reliability of the construction of linear-extended structures using

the failure prediction method. *Magazine of Civil Engineering*. 2013; 3(38):43-50. DOI: 10.5862/MCE.38.6. EDN PZETTH. (rus.).

7. Kerimov F.Yu. *Increasing the organizational and technological reliability of preparation for construction production in the context of reduced resource provision : diss. ... of doctor of technical sciences*. Moscow, 2005; 356. (rus.).

8. Kuznetsov P.A. *Organizational and technological reliability of resource provision for construction reconstruction of emergency facilities : diss. ... doctor of technical sciences*. Moscow, 2006; 426. EDN NOGKCT. (rus.).

9. Nedavny O.I., Bazilevich S.V., Kuznetsov S.M. Assessment of organizational and technological reliability of project construction. *Systems. Methods. Technologies*. 2013; 2(18):137-141. EDN RTJHHZ. (rus.).

10. Kuznetsov S.M., Maslov I.A., Suvorov A.D., Yachmenkov S.N. Assessment of the reliability of organizational and technological solutions in construction. *Transport Construction*. 2007; 1:26-27. EDN UWZCGJ. (rus.).

11. Gureev K.A., Solov'ev V.K. Final comprehensive risk assessment of new facility construction. *Regional and Branch Economy*. 2023; 3:136-142. DOI: 10.47576/2949-1916_2023_3_136. EDN JAEIHY. (rus.).

12. Grabovy P., Sezemin D. Cumulative risk in the implementation of a large-scale integrated project for the construction of a nuclear power plant. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2023; 19(4):38-47. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-4-38-47. EDN UPCJRZ. (rus.).

13. Rudenko A.A. Provision of construction resources as an element of its organizational and technological reliability. *Vestnik of Volzhsky University named after V.N. Tatishchev*. 2023; 2(1):(51):130-139. DOI: 10.51965/2076-7919_2023_2_1_130. EDN MAFCQN. (rus.).

14. Lapidus A.A., Motylev R.V., Sokolnikov V.V. Development of a methodology underlying a deterministic model of construction work arrangements on the basis of the concept of an organizational and technologi-

cal platform for construction. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(1): 116-131. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.116-131. EDN IDDMFY. (rus.).

15. Burcik V.V., Kuzmich N.P. Investigation of factors affecting the quality and organizational and technical reliability of construction. *RISK: Resources, Information, Supply, Competition*. 2023; 1:45-49. DOI: 10.56584/1560-8816-2023-1-45-49. EDN DADLVE. (rus.).

16. 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.).

17. Saati T., Kearns K. *Analytical planning. Organization of systems*. Moscow, Radio and Communication, 1991; 222. (rus.).

18. Mesarovich M., Marko D., Takahara Ya. *Theory of hierarchical multi-level systems*. Moscow, Mir, 1973; 342. (rus.).

19. Sokolnikov V.V. The problem of definitions and classification of theoretical models of construction planning, design preparation and building technology. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(11):1564-1573. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1564-1573. EDN EWIWUJ. (rus.).

20. Telichenko V.I., Lapidus A.A., Morozenko A.A. *Information Modeling of Technologies and Business Processes in Construction*. Moscow, ASV Publishing House, 2008; 144. EDN SAPKVZ. (rus.).

21. Sokolnikov V.V., Molodtsov M.V. Informa-tization of construction production organization and operational management. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(6):1006-1015. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.1006-1015. EDN PDGGHG. (rus.).

22. Marcon P., Zezulka F., Vesely I., Szabo Z., Roubal Z., Sajdl O. et al. Communication Technology for Industry 4.0. *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium — Spring (PIERS)*. 2017; 1694-1697. DOI: 10.1109/piers.2017.8262021

Received October 20, 2025.

Adopted in revised form on May 13, 2026.

Approved for publication on May 15, 2026.

B I O N O T E S : **Roman V. Motylev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Construction Organization; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 19176755, Scopus: 57223004399, ResearcherID: 4712-708, ORCID: 0000-0002-2026-0390; motylev@yandex.ru;

Vladimir V. Sokolnikov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Structures, Buildings and Structures; **Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS)**; 9 Moskovsky prospect, St. Petersburg, 190031, Russian Federation; ID RSCI: 526448, Scopus: 57202821958, ResearcherID: ABA-8338-2021, ORCID: 0000-0003-3768-2079; vschief@yandex.ru.

Authors' contribution:

Roman V. Motylev — research concept, methodology development, idea, article writing.

Vladimir V. Sokolnikov — idea, collection and processing of material, article writing.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.05

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1229-1249

Управление жизненным циклом многофункциональных объектов строительства на основе модели сквозных процессов

Антон Павлович Храбров

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Приведены результаты исследования жизненного цикла (ЖЦ) многофункциональных объектов строительства с учетом их функциональной специфики. Научная проблема исследования заключается в несоответствии существующих способов управления проектами строительства многофункциональных объектов современным требованиям к качеству и эффективности их реализации в рамках теории управления ЖЦ. Объектом исследования являются организационно-технологические решения (ОТР), реализуемые в рамках сквозных процессов через этапы проектирования, строительства и эксплуатации в ходе ЖЦ. Предмет исследования — комплекс критериев оценки качества принимаемых решений: стоимости, надежности, технологичности и функциональности. Цель исследования — разработка многокритериальной системы оценки комплекса ОТР для управления ключевыми сквозными процессами ЖЦ многофункционального объекта.

Материалы и методы. В качестве материалов исследования предложена база данных ОТР, привязанных к этапу ЖЦ строительного объекта и виду сквозного процесса. Разработанная математическая модель выбора и оценки проектных решений на основе матричного метода обработки данных позволяет проводить комплексный анализ эффективности проекта строительства в течение ЖЦ многофункционального объекта.

Результаты. Представлены: база данных ОТР для сквозных процессов на протяжении ЖЦ многофункционального объекта строительства, математическая модель выбора и комплексной оценки проектных решений, практический инструмент управления ЖЦ на основе сравнения различных сценариев организации этапов жизненного цикла и выбора оптимального по критерию стоимости и технологическим характеристикам решений.

Выводы. Область применения инструмента оценки лежит в постановке задачи оптимизации стоимостных и технических характеристик сценария управления ЖЦ многофункционального объекта. Оптимальный выбор технологий, материалов и планировочных решений дает возможность снизить затраты на строительство и эксплуатацию, повысить долговечность и комфортность зданий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: управление жизненным циклом, многофункциональный объект строительства, сквозной процесс, система оценки, организационно-технологические решения, многокритериальный анализ, матричная формализация, база данных

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Храбров А.П. Управление жизненным циклом многофункциональных объектов строительства на основе модели сквозных процессов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 7. С. 1229–1249. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1229-1249

Автор, ответственный за переписку: Антон Павлович Храбров, a.khrabrov@cckgroup.ru.

Life cycle management of multifunctional construction projects based on an end-to-end process model

Anton P. Khrabrov

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

ABSTRACT

Introduction. The paper presents the results of a study of the life cycle of multifunctional construction facilities, taking into account their functional specifics. The scientific problem of the study is the discrepancy between the existing methods of managing projects for the construction of multifunctional facilities and modern requirements for the quality and effectiveness of their implementation within the framework of the theory of life cycle management. The object of the research is organizational and technological solutions implemented within the framework of end-to-end processes through the stages of design, construction and operation within the life cycle. The subject of the research is a set of criteria for assessing the quality of decisions made: cost, reliability, adaptability and functionality. The purpose of the research is to develop a multi-criteria evaluation system for a set of organizational and technological solutions for managing key end-to-end processes of the multifunctional facility's life cycle.

Materials and methods. A database of organizational and technological solutions related to the stage of the life cycle of a construction facility and the type of end-to-end process was proposed as research materials. The developed mathemati-

cal model for selecting and evaluating design solutions based on the matrix data processing method allows for a comprehensive analysis of the effectiveness of a construction project during the life cycle of a multifunctional facility.

Results. The research results include: a database of organizational and technological solutions for end-to-end processes throughout the life cycle of a multifunctional construction facility, a mathematical model for selecting and comprehensively evaluating design solutions, and a practical life cycle management tool based on comparing different scenarios for organizing life cycle stages and selecting optimal solutions based on cost and technological characteristics.

Conclusions. The scope of the assessment tool lies in setting the task of optimizing the cost and technical characteristics of the life cycle management scenario of a multifunctional facility. The optimal choice of technologies, materials, and planning solutions reduces construction and maintenance costs, and increases the durability and comfort of buildings.

KEYWORDS: life cycle management, multifunctional construction facility, end-to-end process, evaluation system, organizational and technological solutions, multi-criteria analysis, matrix formalization, database

FOR CITATION: Khrabrov A.P. Life cycle management of multifunctional construction projects based on an end-to-end process model. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(7):1229-1249. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1229-1249 (rus.).

Corresponding author: Anton P. Khrabrov, a.khrabrov@cckgroup.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Современный тренд в развитии коммерческой недвижимости в городах определяет растущую популярность строительства многофункциональных объектов, способных гибко подстраиваться под потребительский спрос населения. Это обеспечивает стабильность загрузки площадей здания и, как следствие, максимальную эффективность реализации проекта [1–3].

Следующий тренд лежит в области управления строительными проектами на базе концепции жизненного цикла (ЖЦ). Он определяет все больший интерес девелоперских компаний к реализации полного ЖЦ, начиная с этапа планирования до сноса здания, что позволяет расширить границы бизнеса [4, 5]. Мировая практика показывает эффективность такого способа управления: интегрированный процесс принятия взаимосвязанных организационно-технологических решений (ОТР) от этапа к этапу позволяет экономить до 30 % затрат и повышать прибыльность проекта [6, 7].

Управление ЖЦ строительного объекта на основе его оценки (Life cycle assessment (LCA)) основано на комплексном анализе бизнес-проекта на стадиях планирования, проектирования, строительства, эксплуатации, редевелопмента и сноса, что обеспечивает понимание объекта как динамической системы с долгосрочными последствиями [8]. Преимущества реализации такого подхода лежат в сфере достижения множества целей современных концепций городского девелопмента:

1. Концепции гибкости городских решений и быстрой адаптации к условиям изменяющегося пользовательского спроса, что ведет к повышению экономической эффективности строительного проекта [9, 10].
 2. Концепции циркулярной экономики, нацеленной на экономию ресурсов при взаимоувязанном планировании расходов на строительство и эксплуатацию объекта [11, 12].
 3. Концепции цифрового управления, основанной на создании единой BIM-модели и реализации на ее основе интегрированных процессов управления [13, 14].
- Таким образом, управление ЖЦ отвечает за сквозное планирование, нацеленное на максимизацию до-

ходности проекта строительства, оптимизацию затрат на создание объекта, а также вклад в реализацию цели устойчивого городского развития как мирового тренда городского строительства [15, 16].

Анализ мировой и отечественной практики строительства многофункциональных объектов показывает наличие ряда особенностей, отражение которых в процессе управления ЖЦ подобных проектов будет играть ключевую роль в его будущей доходности и определять порядок принятия решений (табл. 1).

В первую очередь, особенностью является повышенная социальная роль многофункционального объекта в городе, что накладывает ответственность за корректный выбор участка с оптимальными условиями транспортной и пешеходной доступности, а также учета интенсивности использования территории в зоне влияния объекта [17]. Повышенные требования к надежности, функциональности, безопасности объекта для различных групп населения определяют выбор соответствующих проектных решений [18].

Немаловажной особенностью остается и целесообразность гибкого управления арендными площадями в соответствии с изменением потребительского спроса, что диктует потребность создания системы контроля и активного реагирования на функциональное заполнение площадей [19]. Указанная особенность определяет частую необходимость редевелопмента или реконструкции здания, и учет данного аспекта при выборе планировочных, конструктивных и инженерных решений здания на этапе проектирования позволит оптимизировать затраты на данный процесс. Он может заключаться в организации малого объема ремонтных работ по изменению внутренней отделки или несущих конструкций здания или его полной реконструкции конструкций. Мировой опыт показывает, что периодичность этого этапа, как правило, от 1 до 5 лет, что требует учета при управлении зданием на всем протяжении его ЖЦ [20].

В области научных исследований актуальными направлениями управления ЖЦ многофункциональных объектов являются:

- применение цифровых инструментов управления на протяжении всего ЖЦ [21–23];

Табл. 1. Особенности управления многофункциональных объектов

Table 1. Management features of multifunctional facilities

Особенности многофункциональных объектов Features of multifunctional facilities	Сквозной процесс управления End-to-end management process	Направления реализации сквозного процесса Directions of implementation of the end-to-end process
Повышенная социальная роль объектов в городе как центров предоставления услуг The increased social role of facilities in the city as service delivery centers	Управление потребительским спросом Consumer demand management	Частая, по сравнению с монофункциональными зданиями, необходимость разработки проектов редевелопмента/реконструкции здания. Требования к обеспечению условий доступности к объекту для различных групп пользователей. Требования к организации универсальной среды. Требования к повышенной надежности и функциональности проектных решений Requirements for ensuring accessibility conditions to the facility for various user groups. Requirements for the organization of a universal environment. There is a frequent need to develop redevelopment/reconstruction projects in comparison with monofunctional buildings. Requirements for increased reliability and functionality of design solutions
Быстрая сменяемость арендаторов и необходимость адаптации пространства под новые функции The rapid turnover of tenants and the need to adapt the space to new functions	Управление материальными потоками и ресурсами Management of material flows and resources	Гибкость пространственно-планировочных решений. Организация технологических процессов в здании. Особые требования к ремонтпригодности и замене конструкций. Системы управления арендным бизнесом Flexibility of spatial planning solutions. Organization of technological processes in the building. Special requirements for maintainability and replacement of structures. Rental business management systems
Повышенные объемы информации по управлению многофункциональностью Increased amounts of information on multi- functionality management	Цифровое управление и контроль Digital management and control	Долгосрочное процессное планирование и прогнозирование целевых характеристик. Сбор, хранение документации. Системы организации взаимосвязанных процессов Collection and storage of documentation. Long-term process planning and forecasting of target characteristics. Systems for organizing interconnected processes
Повышенные требования к безопасности различных групп населения Increased safety requirements for various groups of the population	Управление безопасностью Security management	Требования ГО и ЧС. Экологическая безопасность. Пожарная безопасность и др. Civil defense and emergency requirements. Environmental safety. Fire safety, etc.
Требование соответствия социальных объектов принципам устойчивого развития The requirement of compliance of social facilities with the principles of sustainable development	Управление энергоэффективностью Energy efficiency management	Системы интегрированного управления работой инженерных систем. Технологии умного дома. Мероприятия по повышению энергоэффективности архитектурно-планировочных и конструктивных решений Integrated management systems for engineering systems. Smart home technologies. Measures to improve the energy efficiency of architectural planning and design solutions

- использование современных технологий проектирования, строительства и эксплуатации, нацеленных на повышение надежности, функциональности и технологичности процессов [24, 25];
- реализация сквозных мероприятий по обеспечению экологической безопасности объекта строительства и минимизации вредного воздействия от его эксплуатации на городскую среду;
- вопросы энергоэффективности, рационального использования ресурсов, их рециркуляции и снижения выбросов углекислого газа в процессе эксплуатации [26, 27];
- вопросы изучения социальных эффектов в области формирования многофункциональной городской среды [28, 29];
- вопросы потребительского менеджмента при гибком управлении площадями аренды и способы повышения эффективности проекта [30, 31].

Особое внимание уделяется разработке и научному обоснованию практических инструментов принятия решений в области сквозного управления организационно-технологическими процессами на протяжении ЖЦ на основе методов математического моделирования, многокритериального анализа, технологий обработки больших данных, использования инструмента прогнозирования на базе искусственного интеллекта [32–35].

В настоящее время для России это направление исследований — новое и актуальное, что определяется появлением на рынке девелоперских компаний, предлагающих услуги по сквозному управлению ЖЦ, и недостаточным развитием научно-методической базы для создания инструментов управления ЖЦ многофункциональных объектов.

В отечественной науке управление ЖЦ представляет собой междисциплинарное направление, интегрирующее вопросы проектирования, организации строительного процесса, инженерии, экономики, цифрового менеджмента и экологии. В области проектирования и строительства объектов общественного назначения представлены исследованиями таких российских авторов, как А.А. Лапидус, Л.А. Адамцевич, А.В. Звягинцева [29, 32, 33], которые подчеркивают роль выбора технологий строительства и методов организации строительного производства при управлении ЖЦ. В работах таких авторов, как П.Г. Грабовый, В.В. Волгин, Т.З. Азимов, А.С. Трошин [21, 35, 36–38] рассматриваются вопросы управления рисками при реализации ЖЦ строительных объектов, а также области их возникновения. Исследование Н.Г. Верстиной [20] посвящено анализу современных подходов к обеспечению устойчивого развития строительных организаций. В трудах С.Г. Шеиной [24, 30], В.Я. Мищенко [24] определены особенности оценки стоимости ЖЦ.

Особое внимание в научной сфере уделено применению цифровых технологий. В исследованиях В.И. Травуша, А.Н. Овчинникова и А.А. Волкова,

А.М. Эльмурзаева [22, 23, 25] представлены подходы к информационному моделированию надежности организационно-технологической последовательности строительства. А.О. Рыбакова, В.А. Волкодав, И.А. Волкодав [39, 40] рассмотрели вопросы информационного моделирования и область BIM-технологий для управления ЖЦ зданий. Вопросы эколого-экономического обоснования ЖЦ, которые входят в состав исследования, определены в работе А.А. Бенужа [27], в которой представлена эколого-экономическая модель ЖЦ здания на основе концепции «зеленого» строительства.

Необходимо отметить высокий вклад профессора Л.А. Опариной в многостороннее развитие темы управления ЖЦ, в ее работах представлены и методологически описаны методы применения искусственного интеллекта при реализации технологических процессов строительства [41, 42], а также один подход к реализации сквозного процесса рационального использования материалов при реализации «бережливого производства», рассматриваемых в настоящем исследовании.

Объекты исследования — многофункциональные здания, которые имеют особенности и специфику организации их ЖЦ. Она рассматривалась в работе А.С. Романцова [28] как определение многофункционального комплекса коммерческой недвижимости, а также в ранее выполненной работе автора [34].

Результаты изучения трудов отечественных ученых легли в основу разработки авторского подхода к управлению ЖЦ многофункциональных зданий с учетом комплекса технологических, организационных, экологических, экономических факторов и определили цель данного исследования — построение модели сквозных процессов с учетом особенностей управления ЖЦ многофункциональных объектов строительства и разработка инструмента оценки вариантов ОТР, принимаемых на каждой из стадий ЖЦ на основе матричного метода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования выступает ЖЦ многофункционального объекта строительства, который включает основные этапы: планирование, проектирование, строительство, эксплуатация, редевелопмент и снос. Управление ЖЦ заключается в последовательной организации и контроле сквозных процессов принятия ОТР, имеющих единую цель эффективности. Это позволяет превратить разрозненные этапы в единый управляемый поток информации и материальных ценностей, где все решения скоординированы между собой в рамках единой системы управления.

Для целей исследования определены три этапа ЖЦ, на которых принимаются организационно-технологические решения:

- этап проектирования/редевелопмента — основная стадия принятия ОТР на этапах создания

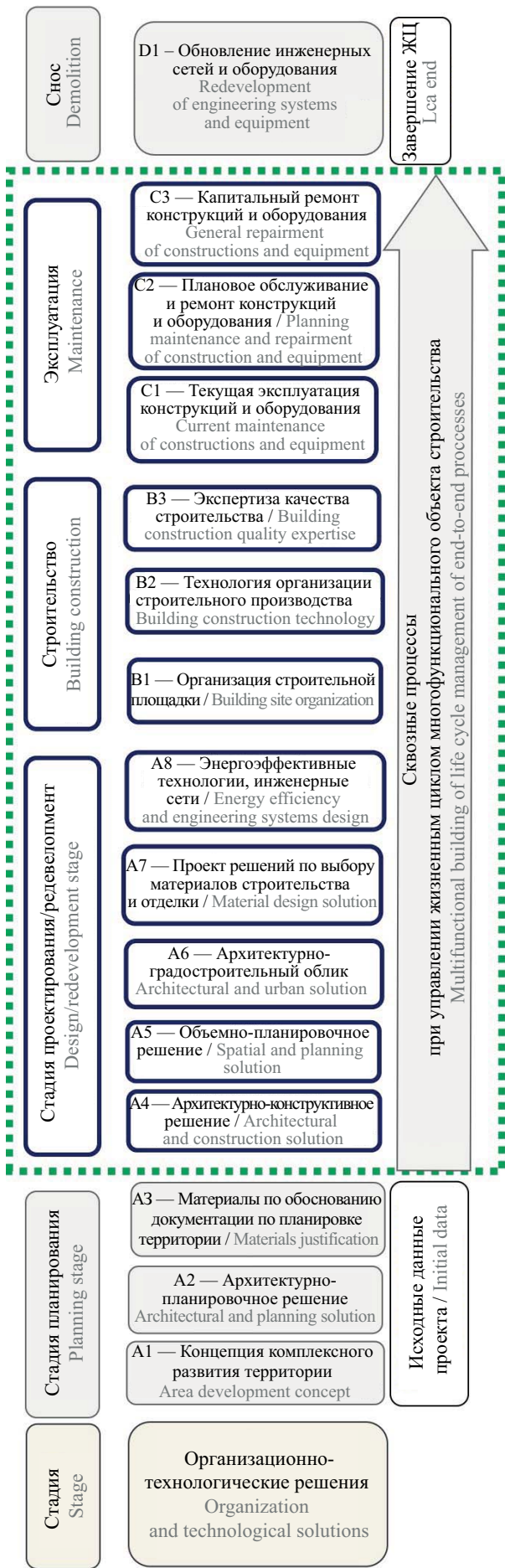


Рис. 1. Структура данных жизненного цикла многофункционального объекта
Fig. 1. The data structure of the life cycle of a multifunctional object

проекта и реализации редевелопмента для адаптации к изменению потребительского спроса;

- этап строительства — стадия создания объекта строительства и область принятия решений по организации строительного производства и контроля качества строительства;

- этап эксплуатации — стадия принятия управленческих решений по типу реализации ОТР по управлению состоянием объекта строительства с целью обеспечения максимальной доходности.

Этап планирования принимается в виде исходных данных для реализации проекта, определяющих финансовую модель его реализации. Этап сноса принимается как окончание ЖЦ и завершение процесса управления.

Редевелопмент является главной особенностью в управлении ЖЦ многофункционального объекта строительства, представляющий часто повторяющийся процесс для гибкой адаптации к потребительскому спросу на предоставляемые услуги со стороны населения.

На рис. 1 представлена структура данных исследования ЖЦ многофункционального объекта, которая включает три основных измерения.

1. Измерение 1 S — этапы ЖЦ:

$$S = \sum S_i, \text{ где } i = \{1, 2, 3\}, \quad (1)$$

где S_1 — этап проектирования; S_2 — этап строительства; S_3 — этап эксплуатации.

2. Измерение 2 G — группы организационно-технологических решений внутри этапа:

$$G = \sum G_j; j = \{1, 2, 3 \dots n\}. \quad (2)$$

Нумерация мероприятий назначается сквозной, где первый индекс — порядковый номер S_i и далее, порядковый номер группы и подгруппы решения. Мероприятия формируют базу данных для управления ЖЦ многофункционального объекта.

3. Измерение 3 K — рассматриваемые сквозные процессы, обеспечивающие эффективность управления ЖЦ многофункционального объекта:

$$K = \sum K_n; n = \{1, 2, 3, 4\}, \quad (3)$$

где K_1 — управление потребительским спросом: комплекс ОТР в области адаптации площадей здания под потребительский спрос; K_2 — управление материальными потоками ресурсами: комплекс ОТР по планированию, закупке, логистике, контролю и утилизации всех физических материалов, необходимых для реализации проекта; K_3 — цифровое управление и контроль: создание единой, непрерывной цифровой среды на основе данных, которая обеспечивает прозрачность, прогнозируемость и оптимальное принятие решений на всех этапах; K_4 — управление безопасностью: целостная, системная и проактивная практика, интегрированная на всех этапах ЖЦ, направленная на минимизацию рисков и обеспечение благополучия для всех участников, взаимодействующих с объектом.

Таким образом, в качестве объекта исследования имеем четкую трехмерную структуру данных в виде матрицы M (этапы $S \times$ группы решений $G \times$ сквозные процессы K). Задача исследования — разработка и обоснование прикладного инструмента для принятия решений по выбору ОТР, определяющих эффективность управления ЖЦ на всем его протяжении, и нужно выбрать оптимальный набор мероприятий по заданным критериям.

В ходе исследования в качестве критериев эффективности E определены четыре параметра:

$$E = \sum (C, R, F, T), \quad (4)$$

где C (Cost) — стоимость реализации мероприятий, денежные единицы; R (Reliability) — надежность, как вклад в общую надежность системы, доля, значение определяется лимитирующим значением. Целевой показатель надежности назначается не менее лимитирующего показателя; F (Functionality) — функциональность, как степень выполнения целевых функций, доля; T (Technology) — технологичность, как уровень внедренных технологий, доля.

Они являются едиными для оценки проектных решений на каждом из этапов (ЖЦ). Оценка эффективности сквозного процесса проводится на основе анализа значения итогового интегрального показателя и сравнения их значения для различных сценариев управления. Он рассчитывается в виде итогового вектора оценки набора решений (Project Evaluation Vector — PEV):

$$PEV = f(C, R, F, T). \quad (5)$$

Порядок исследования представлен в виде четырехшаговой процедуры, целью которой является разработка инструмента управления сквозными процессами на протяжении ЖЦ многофункционального объекта, основанного на системе принятия ОТР, обеспечивающих заданные параметры эффективности (рис. 2).

Первые три блока необходимы для моделирования процесса управления ЖЦ многофункционального объекта строительства на основе разработанной базы данных (рис. 3). Четвертый блок модели определяет принятие обоснованных решений и возможности гибкого управления жизненным циклом.

Блок 1. Формирование базы данных ОТР представляет собой исходные сведения для управления ЖЦ многофункционального объекта строительства. База данных (рис. 4) — это генеральная совокупность всех организационно-технологических решений, которые могут быть реализованы для каждого из рассматриваемых сквозных процессов управления ЖЦ. Модель оценки определяется как трехмерная структура данных $M [S, G, K]$. Каждая запись базы данных представляет собой решение x , описываемое совокупностью полей:

- 1) этап жизненного цикла S_i ;
- 2) группа решений G_j ;
- 3) обеспечиваемый сквозной процесс K_n .

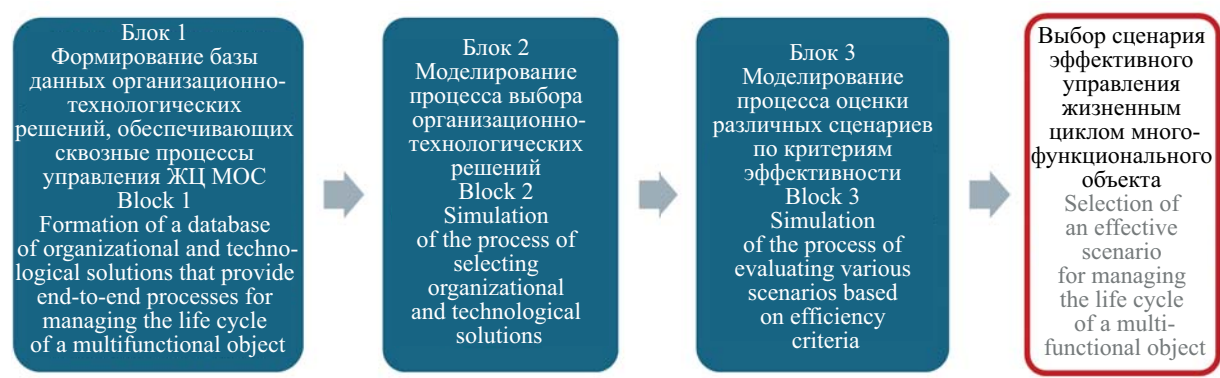


Рис. 2. Моделирование процесса эффективного управления жизненным циклом на основе оценки организационно-технологических решений при реализации сквозных процессов

Fig. 2. Modelling the process of effective life cycle management based on the assessment of organizational and technological solutions in the implementation of end-to-end processes

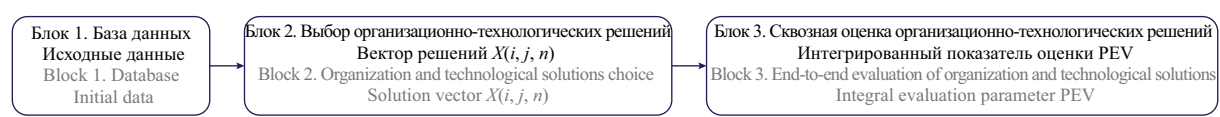


Рис. 3. Структура базы данных

Fig. 3. Database structure

Блок 1 Исходных данных / Block 1 Of the source data					
1		2			3
Этап жизненного цикла Life cycle stage		Организационно-технологические решения Organizational and technological			Сквозной процесс End-to-end process solutions
S		G			K
Этап / Stage	i	Группа Group	Подгруппа Sub group	Решение j Solution j	n
Проектирование Design	1	1	1.1	1.1.1	{1, 2, 3, 4}
				1.1.n	
		1.2		1.2.1	
				1.2.n	
		...	...	...	
				...	
Строительство Construction	2	1	1.1	1.1.1	
				1.1.n	
		1.2		1.2.1	
				1.2.n	
		...	...	...	
				...	
Эксплуатация Maintenance	3	1	1.1	1.1.1	
				1.1.n	
		1.2		1.2.1	
				1.2.n	
		...	...	...	
				...	

Рис. 4. Структура базы данных организационно-технологических решений (Блок 1)

Fig. 4. The structure of the database of organizational and technological solutions (Block 1)

Блок 2. Моделирование процесса выбора ОТР, основанное на матричном инструменте обработки базы данных.

На данном этапе проводится моделирование различных сценариев управления ЖЦ многофункционального объекта путем выбора различных сочетаний ОТР. Элементом матрицы является конкретное решение X , имеющее набор атрибутов (i, j, n) :

$$X[i, j, n] = \{0, 1\}, \tag{6}$$

где 0 — решение не выбрано; 1 — решение выбрано для реализации.

Результатом этапа стала таблица с набором или наборами ОТР для рассматриваемых сценариев управления ЖЦ в виде столбца данных с ненулевыми значениями X (рис. 5).

Количество наборов решений определяется экспертным путем в процессе разработки политики управления ЖЦ.

Блок 3. Моделирование процесса оценки различных сценариев по критериям эффективности в зависимости от поставленных целевых показателей стратегического планирования. Обработка каждого решения по заданным критериям $E_n(C, R, F, T)$ позволяет проводить сквозную оценку по каждому из критериев и их совокупности.

Блок 2 Выбор организационно-технологический решений Block 2 The choice of organizational and technological solutions
4
Свертка матрицы для сценария выбора набора решений с индексом 1 Convolution of the matrix for the scenario of choosing a set of solutions with index 1
$X(i, j, n)$
$x(i, j, n)$
...

Рис. 5. Выбор организационно-технологических решений (Блок 2)

Fig. 5. The choice of organizational and technological solutions (Block 2)

По критерию стоимости C задается денежная единица измерения, для критериев надежности R , функциональности F и технологичности T каждое решение X имеет вес, w в направлении $E_n[i, j, n]$ в диапазоне от 0 до 1.

Для оценки проработки выбранного набора E_n формируем вектор PE :

$$PE = \sum S_i \cdot \sum G_j \cdot (X[i, j, n] \cdot w[i, j, n]). \tag{7}$$

Агрегация оценок выбранного набора, где $x[i, j, n] = 1$ для сквозного процесса E_n определяется расчетом интегрального показателя оценки, который включает следующие параметры:

1. Суммарная стоимость (Total Cost — TC) рассчитывается как простая сумма стоимостей выбранных решений:

$$TC = \sum S_i \cdot \sum G_j \cdot \sum K_n \cdot (X[i, j, n] \cdot C[i, j, n]). \tag{8}$$

2. Интегральная надежность (Aggregate Reliability — AR) рассчитывается как среднее арифметическое значение вектора:

$$AR_{mean} = (\sum (X[i, j, n] \cdot R[i, j, n]))/N, \tag{9}$$

где $X[i, j, n]$ — выбранные решения с индексом 1; $R[i, j, n]$ — заданный вес w надежности решения, не менее целевого показателя надежности лимитирующего элемента; N — число выбранных решений.

3. Интегральная функциональность (Aggregate Functionality — AF) рассчитывается как нормализованный показатель суммарного функционального потенциала набора решений:

$$AF_{norm} = (X[i, j, n] \cdot F[i, j, n])/AF_{max}, \tag{10}$$

где $X[i, j, n]$ — выбранные решения с индексом 1; $F[i, j, n]$ — заданный вес w функциональности решения; AF_{max} — максимально возможное значение AF при выборе всех мероприятий.

4. Интегральная технологичность (Aggregate Technology — AT) рассчитывается как суммарный показатель технологического потенциала набора решений:

$$AT = (X[i, j, n] \cdot T[i, j, n]), \tag{11}$$

где $X[i, j, n]$ — выбранные решения с индексом 1; $T[i, j, n]$ — заданный вес w функциональности решения.

Для формирования итогового вектора оценки набора решений необходимо нормализовать оценочные значения для приведения к единой единице измерения. Пусть для каждого критерия Q определено целевое значение Q_{ideal} или максимально возможное Q_{max} .

Для оценки стоимости TC критериями являются (1) условие соответствия затрат доступному бюджету Budget и (2) минимальные затраты на управление:

$$N_{TC} = 1 - (TC/Budget), \tag{12}$$

если $TC < Budget$, то доля использования бюджета, иначе 0.

Для оценки надежности, функциональности и технологичности критерием служит условие дости-

Блок 3. Сквозная оценка организационно-технологических решений Block 3. End-to-end evaluation of organizational and technological solutions				
	5			
	Вектор P_{En} / Vector P_{En}			
	Стоимость C , ден. ед. Cost C , monetary unit	Надежность R , w , вес Reliability R , w , weight	Функциональность F , w , вес / Functionality F , w , weight	Технологичность T , w , вес / Adaptability T , w , weight
	E_1	E_2	E_3	E_4
	...	...	...	...
Агрегированное значение Aggregated value				
Вес вектора в системе оценки w The weight of the vector in the estimation system w				
Нормализованное значение The normalized value				
Интегрированный показатель оценки PEV Integrated PEV assessment indicator				

Рис. 6. Сквозная оценка организационно-технологических решений в структуре базы данных для оценки организационно-технологических решений (Блок 3)

Fig. 6. End-to-end evaluation of organizational and technological solutions in the database structure for evaluating organizational and technological solutions (Block 3)

жения целевых максимальных значений, заданных сценарием управления жизненным циклом:

$$N_Q = Q/Q_max \rightarrow max. \tag{13}$$

Общий интегральный показатель оценки сценария управления по выбранному набору решений рассчитывается по формуле:

$$PEV = f[N_TC, N_AR, N_AF, N_AT]. \tag{14}$$

Итоги расчетов отражаются в Блоке 3 общей базы данных в виде векторов P_{En} оценочных значений, нормализованных и агрегированных значений по каждому из критериев оценки и в виде общего интегрального показателя PEV (рис. 6).

Дальнейший выбор сценария эффективного управления ЖЦ многофункционального объекта определяется методом экспертного анализа результатов оценки.

Разработанная база данных представляет собой практический инструмент для оценки и выбора сценария эффективного управления ЖЦ многофункционального объекта строительства, а также гибкого управления в процессе его реализации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Апробация результатов исследования включала разработку базы данных ОТР, формирование и оцен-

ку различных стратегических сценариев управления ЖЦ многофункционального объекта на основе разработанного инструмента оценки критериев эффективности.

Блок 1 базы данных представляет собой каталог организационно-технологических решений X с координатами i, j, n . В табл. 2 представлена сжатая версия базы данных, которая включает информацию по принадлежности конкретного ОТР X этапу жизненного цикла S и группе мероприятий G . В колонках по сквозным процессам K_n обозначено количество решений X , внесенных в базу. В настоящее время база данных насчитывает 479 записей и может быть неограниченно расширена.

На следующем этапе рассматривались три сценария управления ЖЦ многофункционального объекта строительства:

Сценарий 1 фрагментарный, выбор ОТР в минимальных объемах без привязки к сквозным процессам. Целевой показатель — минимальная стоимость проекта.

Сценарий 2 интегрированный, реализация организационно-технологических мероприятий в рамках этапов. Целевые показатели — минимальная стоимость каждого этапа при заданных параметрах надежности, технологичности, функциональности.

Сценарий 3 сквозной, выбор решений взаимосвязан от этапа к этапу на основе единой цифровой

Табл. 2. Структура и количественное наполнение базы данных организационно-технологических решений
Table 2. Structure and quantitative content of the database of organizational and technological solutions

Этап Stage	Организационно-технические решения Organizational and technical solutions		Сквозные требования End-to-end requirements			
	Область решений The solution area	Группы мероприятий Action Group	Управление потребительским спросом Consumer demand management	Управление материальными потоками и ресурсами Material flow management	Цифровое управление и контроль Digital management and control	Управление безопасно- стью Security management
E(N)		G	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄
	Планировочная организации земельного участка Planning organization of the land plot	Инженерная подготовка территории Engineering preparation of the territory	3	3	6	5
		Территориальная организация территории Territorial organization of the territory	3	5	3	4
		Транспортное обслуживание Transportation service	2	4	3	3
		Архитектурно-градостроительное решение Architectural and urban planning solution	3	3	2	3
	Объемно-планировочные и архитектурные решения Spatial planning and architectural solutions	Функционально-планировочное решение Functional planning solution	3	3	2	3
		Энергетическая эффективность архитектурных решений Energy efficiency of architectural solutions	3	3	3	4
		Конструктивные решения зданий и сооружений Structural solutions for buildings and structures	Конструктивное решение подземных конструкций Constructive solution of underground structures	3	3	3
	Конструктивное решение основных конструкций Constructive solution of the main structures		3	3	3	3
	Конструктивное решение ограждающих конструкций Constructive solution of enclosing structures		3	3	3	3
Конструктивное решение конструкций полов, кровли, потолков Constructive solution of floor, roof, and ceiling structures	3		3	3	3	
	Обеспечение энергетической эффективности конструктивных решений Ensuring the energy efficiency of constructive solutions	3	3	3	3	
	Технологическая организация Technological organization	6	4	3	2	
	Организация доступа маломобильных групп Organizing access for low-mobility groups	3	2	2	2	
	Организация рабочих мест Organization of workplaces	2	3	2	2	

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Этап Stage	Организационно-технические решения Organizational and technical solutions		Сквозные требования End-to-end requirements			
	Область решений The solution area	Группы мероприятий Action Group	Управление потребительским спросом Consumer demand management	Управление материальными потоками и ресурсами Material flow management	Цифровое управление и контроль Digital management and control	Управление безопасно- стью Security management
Проектирование Design	Решения инженерного оборудования, сетей и систем инженерно-технического обеспечения Solutions for engineering equipment, networks, and engineering support systems	Системы энергетической эффективности Energy efficiency systems	3	3	3	3
		Система электроснабжения Power supply system	3	3	3	3
		Инженерное оборудование, сети и системы инженерно-технического обеспечения Engineering equipment, networks, and engineering support systems	3	3	3	3
	Мероприятия по обеспечению природной и техногенной безопасности Measures to ensure natural and man-made safety	Охрана окружающей среды Environmental protection	5	2	4	3
		Охрана ОКН Cultural protection	2	2	2	2
Строительство Construction		Пожарная безопасность Fire safety	3	3	3	2
		ГО и ЧС Civil defense and emergency situations	2	2	2	2
	Организационная структура строительного производства Organizational structure of construction production	Организационная схема взаимодействия участников Organizational scheme of participants' interaction	3	3	3	3
		Организационная схема взаимодействия участников Organizational scheme of participants' interaction	3	3	3	3
	Организация строительной площадки Organization of the construction site	Организация размещения временной инфраструктуры Organization of temporary infrastructure placement	2	2	2	1
		Организация поставки оборудования и материалов, перевозок, складирования грузов и передвижения строительной техники Organization of the supply of equipment and materials, transportation, storage of goods and movement of construction machinery	3	3	4	4
	Организация строительства (ПОС) Organization of construction	Организация монтажа и демонтажа подъемников Organization of installation and dismantling of lifts	2	3	2	3
		Технология организации строительно-монтажных работ Technology of organization of construction and installation works	2	3	2	3
		Технологии организации движения рабочей силы Technologies for organizing the movement of labor	2	3	2	3
		Технологии обеспечения безопасности Security technologies	2	2	2	5

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Этап Stage	Организационно-технические решения Organizational and technical solutions		Сквозные требования End-to-end requirements			
	Область решений The solution area	Группы мероприятий Action Group	Управление потребительским спросом Consumer demand management	Управление материальными потоками и ресурсами Material flow management	Цифровое управление и контроль Digital management and control	Управление безопасно- стью Security management
Строительство Construction	Транспортная логистика Transport logistics	Поставка строительных конструкций, изделий, материалов и оборудования Supply of building structures, products, materials and equipment	2	3	3	3
	Строительный контроль Construction control	Организация контроля качества выпускаемой готовой строительной продукции Organization of quality control of finished construction products	3	3	2	2
		Организация контроля производственных операций Organization of control of production operation	3	3	2	2
Эксплуатация Maintenance	Организация процесса эксплуатации Organization of the operation process	Организация службы эксплуатации Organization of the maintenance service	3	3	3	3
		Организация процесса эксплуатации Organization of the operation process	3	3	3	3
	Техническое обслуживание ОКС Maintenance of CCP	Содержание зданий и сооружений Maintenance of buildings and structures	3	3	3	3
		Содержание прилегающей территории Maintenance of the surrounding area	3	3	3	3
	Ремонтные работы Repair work	Текущий ремонт Current repairs	3	3	3	3
		Капитальный ремонт объекта Major repairs of the facility	3	3	3	3
	Обеспечение безопасности эксплуатации Ensuring the safety of operation	Пожарная безопасность при эксплуатации Fire safety during operation	2	2	2	4
		Антитеррористическая безопасность Anti-terrorist security	2	2	2	4
		Доступность для маломобильных групп населения Accessibility for low-mobility groups of the population	3	2	2	2
		Автоматизация системы управления при эксплуатации Automation of the control system during operation	3	3	3	3
Общее количество записей в базе данных Total number of records in the database			119	121	115	124

Табл. 3. Краткое описание организационно-технологических решений, принимаемых для каждого сценария управления жизненным циклом
Table 3. A brief description of the organizational and technological decisions taken for each lifecycle management scenario

Этап жизненного цикла Life cycle stage	Фрагментарный сценарий 1 Fragmentary scenario 1	Интегрированный сценарий 2 Integrated scenario 2	Сквозной сценарий 3 End-to-end scenario 3
Проектирование Design	Упрощенное проектирование, минимум инноваций. Раздельное проектирование систем. Локальные программные средства (AutoCAD и т.п.). Выбор типовых конструктивных решений и материалов Simplified design, minimal innovation. Separate system design. Local software tools (AutoCAD, etc.). Selection of standard design solutions and materials	Использование отраслевых стандартов и проверенных решений. Комплексное проектирование систем в рамках этапа с использованием BIM на уровне отдельных систем. Выбор типовых конструктивных решений, модульных решений и материалов Using industry standards and proven solutions. Integrated system design within a stage using BIM at the individual system level. Selection of standard design solutions, modular solutions and materials	Формирование цифровой концепции (Digital Twin) для параметрического проектирования. Система моделирования жизненного цикла с интеграцией с системой управления данными объекта (CDE и LCC). Полноценное BIM (3D-5D-6D) на единой платформе. Выбор гибких архитектурно-планировочных решений. Выбор технологичных и ремонтнопригодных материалов Formation of a digital concept (Digital Twin) for parametric design. Life cycle modelling system with integration with the facility data management system (CDE and LCC). Full-fledged BIM (3D-5D-6D) on a single platform. Selection of flexible architectural and planning solutions. Selection of technologically advanced and maintainable materials
	Выбор разрозненных подрядчиков по минимальной цене. Минимальный контроль качества. Последовательная организация работ. Локальный учет ресурсов (Excel) Selection of disparate contractors at a minimum price. Minimal quality control. Consistent organization of work. Local resource accounting (Excel)	Ручной контроль сроков, качества и бюджета этапа. Применение современных технологий строительства. Локальная оптимизация логистики и поставок Manual control of deadlines, quality and budget of the stage. Application of modern construction technologies. Local optimization of logistics and supplies	Контроль качества, сроков, бюджета на основе BIM-модели. Применение современных технологий строительства. Параллельная организация работ. Планирование и оптимизация логистики и поставок в увязке со сроками строительства на основе системы управления данными Quality control, deadlines, budget based on the BIM model. Application of modern construction technologies. Parallel organization of work. Planning and optimization of logistics and supplies in conjunction with construction deadlines based on a data management system
Строительство Construction			

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Этап жизненного цикла Life cycle stage	Фрагментарный сценарий 1 Fragmentary scenario 1	Интегрированный сценарий 2 Integrated scenario 2	Сквозной сценарий 3 End-to-end scenario 3
Эксплуатация Maintenance	Отсутствие единого управляющего центра. Реактивная модель выполнения работ после отказов. Плановые работы — по минимальным требованиям нормативов. Ручное управление или простейшая автоматизация локальными системами. Отсутствие интеграции между инженерными системами и учет по общим счетчикам. Реактивное взаимодействие с арендаторами по жалобам The absence of a single management center. A reactive model for performing work after failures. Scheduled work — according to the minimum requirements of the standards. Manual control or the simplest automation of local systems. Lack of integration between engineering systems and accounting for common meters. Reactive interaction with tenants on complaints	Единая управляющая компания с четким разграничением зон ответственности. Внедрение системы управления техническим обслуживанием (CMMS). Интегрированные диспетчерские системы по типам систем. Реализация базовых энергосберегающих мероприятий. Превентивная модель планово-предупредительных ТО по регламентам и графикам. Внедрение системы учета по зонам/арендаторам. Использование специализированного ПО для управления арендой (СAM). Учет особенностей разных функций (ресторан, офис, магазин). Комплексная система безопасности на уровне объекта. Набор КРІ по этапу: стоимость эксплуатации на 1 м², коэффициент готовности систем, удовлетворенность арендаторов (опросы) A single management company with a clear delineation of areas of responsibility. Implementation of a maintenance management system (CMMS). Integrated dispatch systems by system type. Implementation of basic energy saving measures. Preventive model of planned preventive maintenance according to regulations and schedules. Implementation of a zone/tenant accounting system. The use of specialized rental management software (CAM). Taking into account the specifics of different functions (restaurant, office, store). Comprehensive security system at the facility level. A set of KPIs by stage: cost of operation per 1 m², system availability coefficient, tenant satisfaction (surveys)	Центр управления объектом на основе единой цифровой платформы. Прогнозная модель: ТО на основе данных датчиков (IoT) и аналитики из цифрового двойника. Динамическое управление энергопотреблением на основе данных о закупаемости, погоды, тарифов. Система непрерывного мониторинга и поиска аномалий (потерь). Интегрированная платформа управления активами (IWMS). Порталы для арендаторов, автоматизация заявок. Анализ эффективности использования площадей, моделирование сценариев перепланировки для максимизации дохода. Единый ситуационный центр безопасности и интеграция всех систем с прогнозной аналитикой. Непрерывный мониторинг износа и актуальности функций. Сбалансированная система показателей (BSC): стоимость жизненного цикла (LCC), общая эффективность оборудования (OEE), индекс удовлетворенности пользователей, энергоэффективность, уровень безопасности Facility management center based on a single digital platform. Predictive model: Maintenance based on sensor data (IoT) and analytics from a digital twin. Dynamic energy consumption management based on occupancy, weather, and tariff data. Continuous monitoring and anomaly (loss) detection system. Integrated Asset Management Platform (IWMS). Portals for tenants, automation of applications. Analyzing the efficiency of using space, modelling redevelopment scenarios to maximize income. A single situational security center and integration of all systems with predictive analytics. Continuous monitoring of wear and function relevance. Balanced Scorecard (BSC): life cycle cost (LCC), Overall equipment efficiency (OEE), user satisfaction index, energy efficiency, safety level

Табл. 4. Результаты оценки критериев эффективности организационно-технологических решений при управлении сквозными процессами

Table 4. Results of evaluation of criteria for the effectiveness of organizational and technological solutions in the management of end-to-end processes

Критерий оценки Evaluation criterion			Нормализованный вид критерия оценки Целевой критерий/фактическое расчетное значение Normalized type of evaluation criterion Target criterion/actual calculated value parameter			
Параметр Parameter		Единица измерения Unit	Условие Condition	Сценарий 1 Scenario 1	Сценарий 2 Scenario 2	Сценарий 3 Scenario 3
Стоимость Cost	TC	Ден. ед. Money	% бюджета % of the budget	100/112 %	100/180 %	100/165 %
Надежность Reliability	AR	Доля Ratio	Значение не менее лимитного The value is not less than the limit value	0,5/0,48	0,75/0,79	0,9/0,95
Функциональность Functionality	AF	Доля Ratio	Значение не менее целевого The value is not less than the limit value	0,6/0,73	0,75/0,87	0,9/0,92
Технологичность Adaptability	AT	Доля Ratio	Значение не менее целевого The value is not less than the limit value	0,6/0,62	0,75/0,81	0,9/0,98
Интегральный показатель Integral indicator	PEV	Доля Ratio	—	0,61	0,823	0,93

платформы. Целевые показатели — балансовые значения между стоимостью, надежностью, технологичностью и функциональностью.

Для каждого сценария сформирован структурированный список организационно-технологических решений с фильтрами по i (этап), j (группа), n (сквозной процесс).

Для целей исследования заданы следующие критерии оценки:

- многофункциональный объект строительства площадью 20 000 м²;
- бюджет — единый для всех вариантов из расчета 150 тыс. руб. на м² (средняя цена строительства в Москве на 2025 г.);
- надежность, функциональность и технологичность ОТР: для сценария 1 — 0,5, для сценария 2 — 0,75, для сценария 3 — 0,9.

В табл. 3 представлено краткое описание решений, принимаемых на каждом из этапов ЖЦ для трех сценариев.

Дальнейшая обработка векторов P_{En} из значений атрибутов для каждого решения отражает текущие значения критериев, процент использования бюджета для показателя стоимости и нормализованный вид агрегированных значений надежности, функциональности и технологичности (TC, AR, AF, AT). Результаты оценки критериев эффективности организационно-технологических решений при управлении сквозными процессами приведены в табл. 4.

Единственным преимуществом *фрагментарного сценария 1* является стоимость его реализации

при низких значениях критериев надежности, функциональности и технологичности. Сценарий 1 не соответствует сложности и социальной значимости многофункционального объекта. Приемлем только для простых объектов с минимальными требованиями. Для многофункциональных объектов несет высокие риски и потенциальные убытки в перспективе.

Сценарий 2 интегрированный обеспечивает приемлемое управление по отдельным аспектам, но не дает синергетического эффекта. Он обладает наиболее высокой стоимостью за счет применения технологичных решений, не связанных сквозными процессами, что приводит к удорожанию ЖЦ в целом, а также средними показателями надежности, функциональности и технологичности. Может быть выбран при ограниченном бюджете и четких, неизменных требованиях на весь срок службы объекта.

Сценарий 3 сквозной наиболее подходит для управления многофункциональными объектами. Он позволяет управлять объектом как единой сложной системой, адаптироваться к изменяющимся социальным и рыночным условиям, обеспечивать безопасность на принципиально новом уровне, максимизировать эффективность использования и коммерческую отдачу. Сценарий характеризуется средней стоимостью, ниже, чем в сценарии 2 за счет применения сквозных технологий, обеспечивающих экономию порядка 30 % на протяжении реализации ЖЦ, а также максимальными показателями надежности, функциональности и технологичности.

В табл. 5 отражены общие выводы по оценке различных сценариев с точки зрения достижения це-

Табл. 5. Оценка эффективности сквозных процессов, реализуемых при управлении жизненным циклом многофункционального объекта строительства

Table 5. Evaluation of the effectiveness of end-to-end processes implemented in managing the life cycle of a multifunctional construction facility

Сквозной процесс End-to-end process	Фрагментарный сценарий 1 Fragmentary scenario 1	Интегрированный сценарий 2 Integrated scenario 2	Сквозной сценарий 3 End-to-end scenario 3
Управление потребительским спросом Consumer demand management	2/10	6/10	9/10
Управление материальными потоками и ресурсами Management of material flows and resources	3/10	7/10	10/10
Цифровое управление и контроль Digital management and control	4/10	8/10	9/10
Управление безопасностью Security management	4/10	7/10	9/10
Оценка эффективности Efficiency rating	Низкая Low	Достаточная Sufficient	Максимальная Maximum

левых критериев, а также общий вывод о степени эффективности применения сценария при управлении жизненным циклом.

Область применения инструмента оценки организационно-технологических решений для различных сценариев управления жизненным циклом позволяет принимать ряд управленческих решений и реализовывать гибкое управление ЖЦ многофункционального объекта и оперативно решать следующие задачи:

- обеспечение целостной картины затрат на реализацию сценария управления жизненным циклом;
- оптимизация и анализ процессов на основе технологии «что, если» (what-if analysis) при изменении целевых значений критериев эффективности;
- разработка рекомендаций по улучшению условий реализации решений на этапах ЖЦ путем выявления и обоснованной корректировки состава решений с целью повышения эффективности управления.

Дальнейший выбор эффективного решения лежит в области сравнения затрат на содержание ЖЦ и прибыли от реализации проекта и относится к дальнейшим направлениям исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование особенностей реализации проектов строительства многофункциональных объектов позволило выделить четыре сквозных процесса, определяющих эффективность управления жизненным циклом. Разработанная структура базы данных организационно-технологических решений, реализуемых сквозным характером на каждом этапе ЖЦ, дает возможность создать систему оценки раз-

личных сценариев управления, определенных набором выбранных решений.

Инструмент оценки эффективности различных сценариев управления ЖЦ основан на многокритериальном анализе критериев стоимости, надежности, технологичности и функциональности. Метод матричного формализма задания оценочных значений и их обработки позволяет реализовывать различные итерации по совершенствованию системы управления в постоянном режиме.

Область применения инструмента оценки лежит в постановке задачи оптимизации стоимостных и технических характеристик сценария управления ЖЦ многофункционального объекта. Оптимальный выбор технологий, материалов и планировочных решений дает возможность снизить затраты на строительство и эксплуатацию, повысить долговечность и комфортность зданий.

Дальнейшая разработка темы исследования лежит в направлении создания программного модуля в составе систем управления проектами многофункциональных объектов строительства, который позволит переводить качественное управление выбором ОТР в плоскость количественного анализа, поддерживая принятие обоснованных решений на всех этапах жизненного цикла.

Таким образом, результаты исследования находятся в области развития научно-обоснованных подходов к сквозному планированию управления жизненным циклом многофункциональных объектов, что будет способствовать повышению качества городского строительства в долгосрочной перспективе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Aghaloo K., Sharifi A.* Balancing priorities for a sustainable future in cities: Land use change and urban ecosystem service dynamics // *Journal of Environmental Management*. 2025. Vol. 382. P. 125460. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.125460. EDN YBUUUZ.
2. *Hsu Y.Y., Han H.* Volumetric landscape: The mix characteristics and co-agglomeration of 3D space use in compact cities // *Landscape and Urban Planning*. 2026. Vol. 266. P. 105536. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2025.105536. EDN ERMVSP.
3. *Ma Ju., Shibuya Yu., Pang Ya., Omata H., Sekimoto Y.* A cost-and-effect simulation model for compact city approaches: A case study in Japan // *Cities*. 2024. Vol. 152. P. 105212. DOI: 10.1016/j.cities.2024.105212. EDN UMARPM.
4. *Yussif A.M., Taiwo R., Shakor P., Han T., Mohandes S.R., Antwi-Afari M.F. et al.* A comprehensive literature review on risk identification and assessment in green building construction projects // *Cleaner Engineering and Technology*. 2025. Vol. 29. P. 101089. DOI: 10.1016/j.clet.2025.101089. EDN IVMUWX.
5. *Wang T., Chen H.M.* Integration of building information modeling and project management in construction project life cycle // *Automation in Construction*. 2023. Vol. 150. P. 104832. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104832. EDN YVWODA.
6. *Dai Sh.* A state-of-the-art review of the life cycle assessment of rammed earth building construction // *Energy and Buildings*. 2026. Vol. 350. P. 116643. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.116643. EDN DBSZMI.
7. *Campo Gay I., Hvam L., Haug A., Huang G.Q., Larsson R.* A digital tool for life cycle assessment in construction projects // *Developments in the Built Environment*. 2024. Vol. 20. P. 100535. DOI: 10.1016/j.dibe.2024.100535. EDN OTZJOK.
8. *Bibri S.E., Krogstie J., Kärrholm M.* Compact city planning and development: Emerging practices and strategies for achieving the goals of sustainability // *Developments in the Built Environment*. 2020. Vol. 4. P. 100021. DOI: 10.1016/j.dibe.2020.100021. EDN MMRVCA.
9. *Duff C.* The affective organisation of social infrastructures // *Social Science & Medicine*. 2026. Vol. 390. P. 118873. DOI: 10.1016/j.socscimed.2025.118873. EDN JJZYJE.
10. *Di Pietro A., Tofani A., Fuggini C., Solari C., Oliva G.* An impact risk assessment methodology for the evaluation of the economic, social and operational resilience of critical infrastructures // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2026. Vol. 132. P. 105965. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2025.105965. EDN WLEMKY.
11. *Hoang V.H., Dong V.C., Tran T.M.T.* Determinants of transforming to a circular economy: Evidence from a developing country // *Sustainable Futures*. 2026. Vol. 11. P. 101665. DOI: 10.1016/j.sfr.2026.101665.
12. *Abiodun O., Abadi M., Ejohwomu O., Manu P.* Transitioning to smart circular construction: A conceptual framework for circular economy implementation through Construction 4.0 technologies // *Environmental Impact Assessment Review*. 2026. Vol. 118. P. 108260. DOI: 10.1016/j.eiar.2025.108260. EDN CTTCVH.
13. *Aigbavboa C., Kissi E.* Understanding digital construction management // *Digital Management of Construction Costs*. 2025. Pp. 27–38. DOI: 10.1016/b978-0-443-23715-7.00003-2.
14. *Luo H., Lin L., Chen Ke., Antwi-Afari M.F., Chen L.* Digital technology for quality management in construction: A review and future research directions // *Developments in the Built Environment*. 2022. Vol. 12. P. 100087. DOI: 10.1016/j.dibe.2022.100087. EDN XCZTSV.
15. *Liew E.F.Y., Ong D.E.L., Peerun M.I.* Mapping the future of sustainable construction: Review on digitalisation and life cycle assessment trends in Asia-Pacific // *Energy and Buildings*. 2026. Vol. 350. P. 116547. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.116547. EDN UFOEBK.
16. *Khadim N., van Marrewijk A.* Circles of profit: A conceptual framework for economic and financial aspects in circular construction // *Sustainable Production and Consumption*. 2025. Vol. 55. Pp. 444–457. DOI: 10.1016/j.spc.2025.03.007. EDN LLWTYO.
17. *Avdiushchenko A., Meinrenken Ch.J.* Circular economy concepts for accelerating sustainable urban transformation: The case of New York City // *Cities*. 2025. Vol. 166. P. 106223. DOI: 10.1016/j.cities.2025.106223. EDN PKIRSZ.
18. *Гинзбург А.В., Жавнеров П.Б.* Влияние мероприятий по повышению организационно-технологической надежности на функционирование строительной организации и планирование строительства // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2014. № 3. С. 94–96. EDN SHVHSX.
19. *Ibrahim A., Kineber A.F., Hassan A., Elsekiny M., Elrifae M., Alhusban M.* Cyber technology in construction projects: A pathway to efficiency and sustainability // *Results in Engineering*. 2026. Vol. 29. P. 108615. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.108615. EDN AEAXKV.
20. *Верстина Н.Г., Рыбнов А.Е.* Современный подход к обеспечению устойчивого развития строительных организаций на основе комплекса управленческих инструментов // *Экономика, предпринимательство и право*. 2025. Т. 15. № 11. С. 7225–7240. DOI: 10.18334/epp.15.11.124321. EDN KOMZEI.
21. *Трошин А.С., Столярова З.В., Лесовик Р.В., Есипов С.М., Лесовик Г.А.* Анализ системы управления рисками на различных стадиях жизненного цикла строительных объектов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2025. № 11. С. 88–99. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-88-99. EDN DDHCWU.

22. Овчинников А.Н., Волков А.А. Информационное моделирование для оценки надежности организационно-технологической последовательности строительства // Инновации и инвестиции. 2019. № 1. С. 216–218. EDN DYWQBZ.

23. Травуш В.И. Цифровые технологии в строительстве // Academia. Архитектура и строительство. 2018. № 3. С. 107–117. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-3-107-117. EDN VJBYXS.

24. Шеина С.Г., Мищенко В.Я., Сергеев Ю.Д., Мясичев Р.Ю., Сергеева А.Ю. Организационно-технологические решения при выявлении взаимозависимостей между параметрами потока и себестоимостью выполнения работ // Инженерный вестник Дона. 2025. № 2 (122). С. 738–748. EDN STEULY.

25. Эльмурзаев А.М. Современные подходы к организационно-технологическому моделированию проектирования зданий и сооружений // Вестник КНИИ РАН. Серия: Естественные и технические науки. 2025. № 3 (22). С. 317–325. DOI: 10.69537/VKNIIRAN.2025.22.3.024. EDN WSR0HL.

26. Sun Yu., Zhou Z., Li Q., He H. A novel risk assessment method for advanced and environmentally friendly construction technologies integrating RBM and I-OPA // Alexandria Engineering Journal. 2025. Vol. 113. Pp. 648–660. DOI: 10.1016/j.aej.2024.11.059. EDN NNHYKV.

27. Бенуж А.А. Эколого-экономическая модель жизненного цикла здания на основе концепции «зеленого» строительства : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2013. 24 с. EDN SVHDKP.

28. Романцов А.С. Определение многофункционального комплекса коммерческой недвижимости // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 3 (36). С. 155–163. EDN NZFGSH.

29. Звягинцева А.В., Сазонова С.А., Кульнева В.В. Применение методов численного моделирования для оценки безопасности на объектах общественного назначения // Моделирование систем и процессов. 2020. Т. 13. № 3. С. 30–42. DOI: 10.12737/2219-0767-2020-13-3-30-42. EDN JRBWFZ.

30. Шеина С.Г., Миргородская Е.О., Миненко Е.Н. Анализ особенностей применения метода оценки стоимости жизненного цикла зданий в России и за рубежом // Строительство и техногенная безопасность. 2015. № 1 (53). С. 76–80. EDN VMIWTR.

31. Бутовка А.Н., Кретов Д.А., Потапов Б.В., Рощина Н.Н. Аналитический обзор нормативных и методических документов в области оценки стоимости жизненного цикла объектов: на примере трубопроводов сетей водоснабжения и водоотведения // Градостроительство и архитектура. 2025. Т. 15. № 3 (60). С. 43–53. DOI: 10.17673/Vestnik.2025.03.06. EDN G0HYEV.

32. Ланидус А.А., Адамцевич Л.А. Сценарно-ориентированное проектирование объектов строительства в проектах комплексного развития террито-

рий // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 8. С. 1278–1291. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1278-1291. EDN DADHEW.

33. Ланидус А.А., Хитрова Т.И., Щукин А.Ю. Применение информационных технологий в строительном контроле // Строительное производство. 2025. № 1. С. 92–99. DOI: 10.54950/26585340_2025_1_92. EDN GFPSEE.

34. Храбров А.П. Влияние проектных решений многофункциональных торговых объектов на управление жизненным циклом // Недвижимость: экономика, управление. 2024. № S3. С. 18–25. EDN ZCURWO.

35. Grabovyy P.G., Azhimov T.Z. Strategic directions and development prospects of the construction industry in Russia // Real Estate: Economics, Management. 2024. No. 2. Pp. 6–11. EDN LBZYLE.

36. Грабовый П.Г., Волгин В.В., Кущенко И.В., Сеземин Д.Е., Ткаченко В.Б. Технология организации территориально-пространственного обновления городской недвижимости, концентрации и специализации промышленного производства. М., 2024. EDN MIWUJI.

37. Ланидус А.А., Адамцевич Л.А. Сценарно-ориентированное проектирование объектов строительства в проектах комплексного развития территорий // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 8. С. 1278–1291. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1278-1291. EDN DADHEW.

38. Volgin V.V. Risk management in the implementation of investment and construction projects // Real Estate: Economics, Management. 2024. No. 2. Pp. 20–26. EDN WPXGJR.

39. Рыбакова А.О. Методика разработки информационной модели на основе модульных элементов максимальной готовности // Строительное производство. 2023. № 2. С. 99–101. DOI: 10.54950/26585340_2023_2_99. EDN UDIPTD.

40. Волкодав В.А., Волкодав И.А. Разработка структуры и состава классификатора строительной информации для применения BIM-технологий // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 6. С. 867–906. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.867-906. EDN RGQGT0.

41. Опарина Л.А., Барзыгин Е.А., Огурцов В.А., Карась Р.С. Совместное применение пакетно-узлового метода и технологий искусственного интеллекта в календарно-сетевом планировании строительных проектов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. № 1. С. 107–121. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.107-121. EDN IOMRAT.

42. Опарина Л.А., Барзыгин Е.А., Гряднева Я.А., Касьяненко Н.С. Использование инструмента бережливого производства в управлении поставками материалов в течение жизненного цикла строительного проекта // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 5. С. 826–835. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.826-835. EDN BEOAMF.

Поступила в редакцию 29 января 2026 г.

Принята в доработанном виде 31 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 8 апреля 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: **Антон Павлович Храбров** — аспирант, старший преподаватель кафедры организации строительства и управления недвижимостью; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; a.khrabrov@ckgroup.ru.

REFERENCES

1. Aghaloo K., Sharifi A. Balancing priorities for a sustainable future in cities: Land use change and urban ecosystem service dynamics. *Journal of Environmental Management*. 2025; 382:125460. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.125460. EDN YBUUUZ.
2. Hsu Y.Y., Han H. Volumetric landscape: The mix characteristics and co-agglomeration of 3D space use in compact cities. *Landscape and Urban Planning*. 2026; 266:105536. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2025.105536. EDN ERMVSP.
3. Ma Ju., Shibuya Yu., Pang Ya., Omata H., Sekimoto Y. A cost-and-effect simulation model for compact city approaches: A case study in Japan. *Cities*. 2024; 152:105212. DOI: 10.1016/j.cities.2024.105212. EDN UMARPM.
4. Yussif A.M., Taiwo R., Shakor P., Han T., Mohandes S.R., Antwi-Afari M.F. et al. A comprehensive literature review on risk identification and assessment in green building construction projects. *Cleaner Engineering and Technology*. 2025; 29:101089. DOI: 10.1016/j.clet.2025.101089. EDN IVMUWX.
5. Wang T., Chen H.M. Integration of building information modeling and project management in construction project life cycle. *Automation in Construction*. 2023; 150:104832. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104832. EDN YVWODA.
6. Dai Sh. A state-of-the-art review of the life cycle assessment of rammed earth building construction. *Energy and Buildings*. 2026; 350:116643. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.116643. EDN DBSZMI.
7. Campo Gay I., Hvam L., Haug A., Huang G.Q., Larsson R. A digital tool for life cycle assessment in construction projects. *Developments in the Built Environment*. 2024; 20:100535. DOI: 10.1016/j.dibe.2024.100535. EDN OTZJOK.
8. Bibri S.E., Krogstie J., Kärrholm M. Compact city planning and development: Emerging practices and strategies for achieving the goals of sustainability. *Developments in the Built Environment*. 2020; 4:100021. DOI: 10.1016/j.dibe.2020.100021. EDN MMRVCA.
9. Duff C. The affective organisation of social infrastructures. *Social Science & Medicine*. 2026; 390:118873. DOI: 10.1016/j.socscimed.2025.118873. EDN JJZYJE.
10. Di Pietro A., Tofani A., Fuggini C., Solari C., Olivera G. An impact risk assessment methodology for the evaluation of the economic, social and operational resilience of critical infrastructures. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2026; 132:105965. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2025.105965. EDN WLEMKY.
11. Hoang V.H., Dong V.C., Tran T.M.T. Determinants of transforming to a circular economy: Evidence from a developing country. *Sustainable Futures*. 2026; 11:101665. DOI: 10.1016/j.sfr.2026.101665.
12. Abiodun O., Abadi M., Ejohwomu O., Manu P. Transitioning to smart circular construction: A conceptual framework for circular economy implementation through Construction 4.0 technologies. *Environmental Impact Assessment Review*. 2026; 118:108260. DOI: 10.1016/j.eiar.2025.108260. EDN CTTCVH.
13. Aigbavboa C., Kissi E. Understanding digital construction management. *Digital Management of Construction Costs*. 2025; 27-38. DOI: 10.1016/b978-0-443-23715-7.00003-2.
14. Luo H., Lin L., Chen Ke., Antwi-Afari M.F., Chen L. Digital technology for quality management in construction: A review and future research directions. *Developments in the Built Environment*. 2022; 12:100087. DOI: 10.1016/j.dibe.2022.100087. EDN XCZTSV.
15. Liew E.F.Y., Ong D.E.L., Peerun M.I. Mapping the future of sustainable construction: Review on digitalisation and life cycle assessment trends in Asia-pacific. *Energy and Buildings*. 2026; 350:116547. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.116547. EDN UFOEBK.
16. Khadim N., van Marrewijk A. Circles of profit: A conceptual framework for economic and financial aspects in circular construction. *Sustainable Production and Consumption*. 2025; 55:444-457. DOI: 10.1016/j.spc.2025.03.007. EDN LLWTYO.
17. Avdiushchenko A., Meinrenken Ch.J. Circular economy concepts for accelerating sustainable urban transformation: The case of New York City. *Cities*. 2025; 166:106223. DOI: 10.1016/j.cities.2025.106223. EDN PKIRSZ.
18. Ginzburg A.V., Zhavnerov P.B. Influence of measures to improve organizational technological reliability of operation building organization and planning construction. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2014; 3:94-96. EDN SHVHSX. (rus.).
19. Ibrahim A., Kineber A.F., Hassan A., Elseknidy M., Elrifae M., Alhusban M. Cyber technology in construction projects: A pathway to efficiency and

sustainability. *Results in Engineering*. 2026; 29:108615. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.108615. EDN AEAXKV.

20. Verstina N.G., Rybnov A.E. A modern approach to ensuring the sustainable development of construction companies based on a set of management tools. *Journal of Economics, entrepreneurship and law*. 2025; 15(11):7225-7240. DOI: 10.18334/epp.15.11.124321. EDN KOMZEI. (rus.).

21. Troshin A., Stolyarova Z., Lesovik R., Esipov S., Lesovik G. Analysis of the risk management system at various stages of the life cycle of construction facilities. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2025; 11:88-99. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-88-99. EDN DDHCWU. (rus.).

22. Ovchinnikov A.N., Volkov A.A. Information modeling for assessing the reliability of the organizational and technological sequence of construction. *Innovation and Investment*. 2019; 1:216-218. EDN DYWQBZ. (rus.).

23. Travush V.I. Digital technologies in construction. *Academia. Architecture and Construction*. 2018; 3:107-117. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-3-107-117. EDN VJBYXC. (rus.).

24. Sheina S.G., Mishchenko V.Ya., Sergeev Yu.D., Myasishchev R.Yu., Sergeeva A.Yu. Organizational and technological solutions for identifying the interdependencies between the flow parameters and the cost of work. *Engineering journal of Don*. 2025; 2(122):738-748. EDN STEULY. (rus.).

25. Elmurzaev A.M. Modern approaches to organizational and technological modeling of buildings and structures design. *Bulletin of the Research Institute of the Russian Academy of Sciences. The series "Natural and Technical Sciences"*. 2025; 3(22):317-325. DOI: 10.69537/VKNIIRAN.2025.22.3.024. EDN WSROHI. (rus.).

26. Sun Yu., Zhou Z., Li Q., He H. A novel risk assessment method for advanced and environmentally friendly construction technologies integrating RBM and I-OPA. *Alexandria Engineering Journal*. 2025; 113:648-660. DOI: 10.1016/j.aej.2024.11.059. EDN NNHYKV.

27. Benuzh A.A. *Ecological and economic model of the building life cycle based on the concept of "green" construction : abstract of the dissertation of Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2013; 24. EDN SVHDKP. (rus.).

28. Romantsov A.S. Definition of the multipurpose complex commercial real estate. *Proceedings of the Southwest State University*. 2011; 3(36):155-163. EDN NZFGSH. (rus.).

29. Zvyaginets A., Sazonova S., Kul'neva V. Application of numerical modeling methods for safety assessment at public facilities. *Modeling of Systems and Processes*. 2020; 13(3):30-42. DOI: 10.12737/2219-0767-2020-13-3-30-42. EDN JRBWFZ. (rus.).

30. Sheina S.G., Mirgorodskaya E.O., Minenko E.N. Analysis of the application of the method of estimating the cost of the life cycle of buildings in Russia and

abroad. *Construction and Industrial Safety*. 2015; 1(53):76-80. EDN VMIWTR. (rus.).

31. Butovka A.N., Kretov D.A.I., Potapov B.V., Roshina N.N. Analytical review of regulatory and methodological documents in the field of assessment of the life cycle cost of objects: on the example of pipelines of water supply and sewage networks. *Urban Construction and Architecture*. 2025; 15(3):(60):43-53. DOI: 10.17673/Vestnik.2025.03.06. EDN GOHYEV. (rus.).

32. Lapidus A.A., Adamtsevich L.A. Scenario-oriented design of construction projects in integrated territorial development projects. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2025; 20(8): 1278-1291. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1278-1291. EDN DADHEW. (rus.).

33. Lapidus A.A., Khitrova T.I., Shchukin A.Yu. Application of information technologies in construction control. *Construction Production*. 2025; 1:92-99. DOI: 10.54950/26585340_2025_1_92. EDN GFPSEE. (rus.).

34. Khrabrov A.P. The impact of design solutions of multifunctional retail facilities on the life cycle management. *Real Estate: Economics, Management*. 2024; S3:18-25. EDN ZCURWO. (rus.).

35. Grabovyy P.G., Azhimov T.Z. Strategic directions and development prospects of the construction industry in Russia. *Real Estate: Economics, Management*. 2024; 2:6-11. EDN LBZYLE.

36. Grabovyy P.G., Volgin V.V., Kushchenko I.V., Sezemin D.E., Tkachenko V.B. *Technology of organization of spatial renewal of urban real estate, concentration and specialization of industrial production*. Moscow, 2024. EDN MIWUJI. (rus.).

37. Lapidus A.A., Adamtsevich L.A. Scenario-oriented design of construction projects in integrated territorial development projects. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2025; 20(8): 1278-1291. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1278-1291. EDN DADHEW. (rus.).

38. Volgin V.V. Risk management in the implementation of investment and construction projects. *Real Estate: Economics, Management*. 2024; 2:20-26. EDN WPXGJR.

39. Rybakova A.O. Methodology for developing an information model based on modular elements of maximum availability. *Construction Production*. 2023; 2:99-101. DOI: 10.54950/26585340_2023_2_99. EDN UDIPTD. (rus.).

40. Volkodav V.A., Volkodav I.A. Development of the structure and composition of a building information classifier towards the application of BIM technologies. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(6):867-906. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.867-906. EDN RGQGTO. (rus.).

41. Oparina L.A., Barzygin E.A., Ogurtsov V.A., Karas R.S. Combined use of the package-node method and artificial intelligence technologies in calendar-network planning of construction projects. *Vestnik MGSU*

[Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(1):107-121. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.107-121. EDN IOMRAT. (rus.).

42. Oparina L.A., Barzygin E.A., Gridneva Ya.A., Kasyanenko N.S. Using lean manufacturing tools in ma-

terials supply management during the life cycle of a construction project. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):826-835. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.826-835. EDN BEOAMF. (rus.).

Received January 29, 2026.

Adopted in revised form on March 31, 2026.

Approved for publication on April 8, 2026.

B I O N O T E S : **Anton P. Khrabrov** — postgraduate student, senior lecturer of the Department of Construction Organization and Real Estate Management; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; a.khrabrov@cckgroup.ru.

Проблемы развития региональной логистической
транспортной системы России в условиях санкций

Елена Викторовна Быковская¹, Екатерина Игоревна Дмитриева²,
Валерий Викторович Бирюков³, Александр Александрович Сергеев¹

¹ Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ); г. Тамбов, Россия;

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

³ Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова (КартУ);
г. Караганда, Республика Казахстан

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность исследуемой темы определяется тем, что транспортная логистика принимает непосредственное участие в обеспечении предприятий, в том числе инвестиционно-строительной сферы (ИСС) материальными потоками, реализации готовой продукции, от эффективности и сбалансированности этого вида логистики зависит экономический рост, обороноспособность страны и качество жизни населения. Цель исследования заключается в анализе текущих проблем и характеристики логистической транспортной системы России в контексте действующих санкций и выявлении возможных путей их решения.

Материалы и методы. В исследовании анализа контейнерных перевозок в портах России использовались данные из официальных статистических отчетов и публикаций в области логистики и транспорта. В качестве методов исследования применены количественный анализ, сравнительный анализ динамики грузопотоков по различным маршрутам и видам транспортировки.

Результаты. Рассматриваются основные виды санкций, их влияние на транспортную систему страны и последствия для экономики, определены новые тренды в логистической деятельности, предлагаются меры по снижению негативного влияния антироссийских санкций, такие как оптимизация транспортной инфраструктуры, активная поддержка частных инициатив и развитие новых моделей логистического взаимодействия. Особое внимание уделено переориентации логистической деятельности с западного на восточное и южное направления. Также сделан акцент на дальнейшем развитии отечественного программного обеспечения и интеграции новых технологий для повышения эффективности логистики.

Выводы. Потребность в создании надежной логистической системы для обеспечения экономического роста страны и ее ИСС становится критически важной, особенно в контексте переориентации грузопотоков на Восток. Новая логистика подразумевает использование прокси-государств и прокси-покупателей, что создает новые экономические вызовы и возможности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: санкции, логистические транспортные системы, модели логистического взаимодействия, логистические цепочки, виды транспорта, инвестиционно-строительная сфера

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Быковская Е.В., Дмитриева Е.И., Бирюков В.В., Сергеев А.А. Проблемы развития региональной логистической транспортной системы России в условиях санкций // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 7. С. 1250–1260. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1250-1260

Автор, ответственный за переписку: Екатерина Игоревна Дмитриева, dmitrievaei@mgisu.ru.

Challenges in the development of Russia’s regional transport
and logistics system under sanctions

Elena V. Bykovskaya¹, Ekaterina I. Dmitrieva²,
Valerij V. Biryukov³, Aleksandr A. Sergeev¹

¹ Tambov State Technical University; Tambov, Russian Federation;

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

³ Abylkas Saginov Karaganda Technical University; Karaganda, Republic of Kazakhstan

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the topic under study is determined by the fact that transport logistics is directly involved in providing enterprises, including the construction sector, with material flows and the sale of finished products, and economic growth, the country’s defense capability and the quality of life of the population depend on the effectiveness and balance of this type of logistics. Most of the imposed sanctions represent serious economic and political pressure.

Materials and methods. The study of container shipping analysis in Russian ports used data from official statistical reports and publications in the field of logistics and transport. The research methods used were quantitative analysis, comparative analysis of the dynamics of cargo flows along various routes and types of transportation.

Results. The study examines the main types of sanctions, their impact on the country's transport system and its consequences for the economy, and identifies new trends in logistics activities, and also proposes measures to reduce the negative impact of anti-Russian sanctions, such as optimization of transport infrastructure, active support of private initiatives and the development of new models of logistics interaction. Particular attention is paid to the reorientation of logistics activities from Europe to the countries of Central, East and South Asia. Emphasis is also placed on the further development of domestic software and the integration of new technologies to improve the efficiency of logistics.

Conclusions. The need to create a reliable logistics system to ensure the economic growth of the country and its investment and construction sector is becoming critically important, especially in the context of the reorientation of cargo flows to the East. New logistics involves the use of proxy states and proxy buyers, which creates new economic challenges and opportunities.

KEYWORDS: sanctions, logistic transport systems, models of logistic interaction, logistics chains, modes of transport, investment and construction sector

FOR CITATION: Bykovskaya E.V., Dmitrieva E.I., Biryukov V.V., Sergeev A.A. Challenges in the development of Russia's regional transport and logistics system under sanctions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(7):1250-1260. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1250-1260 (rus.).

Corresponding author: Ekaterina I. Dmitrieva, dmitrievaei@mgsu.ru.

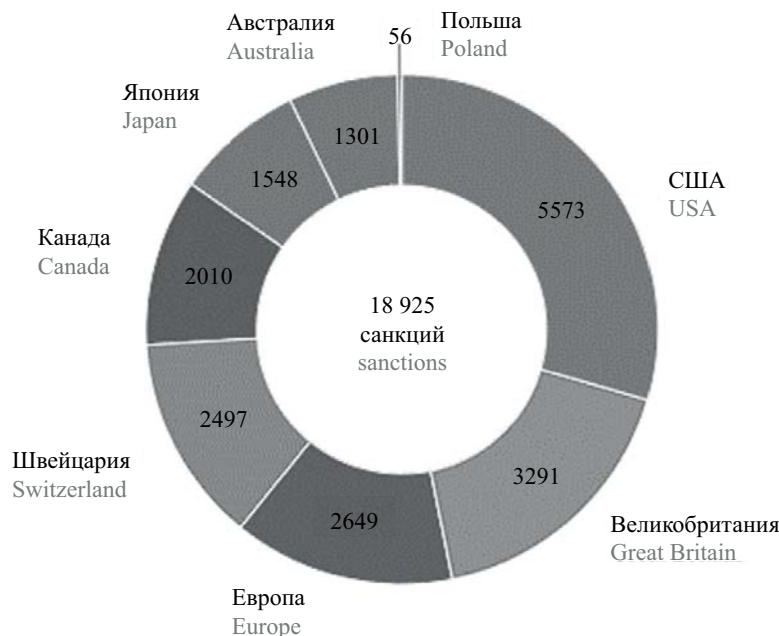
ВВЕДЕНИЕ

Логистические транспортные системы регионов РФ в настоящий момент подвергаются нарастающему давлению в условиях санкционных ограничений и растущей степени турбулентности этого процесса, а также неопределенности вектора общего экономико-политического аспекта развития регионов РФ.

С одной стороны, санкции — это экономические и политические меры, направленные на оказание влияния на поведение государства, группы лиц или отдельных лиц через ограничение свободы, осуществляемое на основании одностороннего решения иного государства или коллективного решения нескольких государств. С другой стороны, санкции являются неким инструментом для достижения опре-

деленных геополитических целей в интересах иного государства или нескольких государств [1].

Экономические и торговые санкции — одни из наиболее часто применяемых инструментов в практике оказывания давления для снижения экономической активности государства, обладающие повышенным ресурсным потенциалом и определенным геополитическим весом на мировом рынке. Но экономические санкции могут принимать различные формы в зависимости от того, чего пытается добиться санкционирующая страна. Безусловно, все формы экономических санкций имеют одну общую черту — они используются для прямого или косвенного влияния (обычно путем разного рода ограничений) на торговую деятельность страны, добиваясь



Санкции в отношении российских физических и юридических лиц по инициаторам [2]

Sanctions against Russian individuals and legal entities by initiators [2]

тем самым замедления темпов ее социально-экономического развития.

Из числа экономически значимых отраслей российской экономики наиболее остро почувствовали последствия санкций предприятия инвестиционно-строительной сферы (ИСС). Ограничения на поставку иностранных материалов и технологий, рост цен и необходимость перехода на импортозамещение — все это влияет как на рынок недвижимости, так и на качество нового жилья. Многие застройщики были вынуждены срочно искать альтернативы среди отечественных производителей или новых поставщиков из Азии, Турции и других стран.

Последние несколько лет Россия испытывает колоссальное давление в виде бесчисленного количества санкций, наложенных странами США, Великобританией, Европейского Союза и других (рис.), преследующих цель сделать государство более экономически слабым и готовым идти на различные уступки данным государствам.

Несмотря на существующие ограничения в виде санкций, наше государство смогло удержать экономическую стабильность и выбрать новые направления внешнеэкономического развития с другими более лояльными государствами, имеющими интерес в экономическом и политическом сотрудничестве.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

До введения санкций главными агентами торговой экономической и соответственно логистической региональной и отраслевой политики РФ были западные страны. Как показывает проведенное ранее исследование, можно выделить влияние санкций ЕС, действующих на следующие виды транспорта¹, которые используются в том числе и для обеспечения ресурсами ИСС:

- дорожный транспорт: ЕС запретил российским автоперевозчикам, прицепах и полуприцепах перевозить грузы на территории стран Евросоюза [2];
- авиационный транспорт: ЕС запретил всем российским самолетам, включая частные, доступ в аэропорты и пролет над воздушным пространством;
- морской транспорт: ЕС закрыл свои порты для всего торгового флота России, насчитывающего более 2800 судов. Однако эта мера не распространяется на суда, перевозящие энергетические, фармацевтические, медицинские, сельскохозяйственные и пищевые продукты, гуманитарную помощь, уголь, ядерное

топливо и другие грузы, необходимые для функционирования гражданских ядерных мощностей [3].

Как известно, одной из основных целей санкций были и остаются денежные активы России в размере 350 млрд долл., замороженные Европейским союзом после начала конфликта на Украине в 2022 г., а в декабре 2025 г. было принято решение продлить этот запрет на возврат средств бессрочно.

Вместе с тем, как показывает практика исследования, еще одной крупной целью стала российская нефтяная промышленность. США и Великобритания запретили российскую нефть и природный газ. ЕС запретил морской импорт сырой нефти. «Большая семерка» установила максимальную цену на российскую сырую нефть в размере 60 долл. за баррель, чтобы попытаться сократить ее доходы. Но, несмотря на ограничения, Россия смогла в рассматриваемый период продать нефть за границу по цене, превышающей установленный G7 ценовой предел. Международное энергетическое агентство сообщает, что Россия по-прежнему экспортирует 8,3 млн баррелей нефти в день, увеличив поставки в Индию и Китай¹ [4].

Так или иначе за последние 30 лет многие отрасли народного хозяйства отечественной экономики были тесно интегрированы с большим количеством недружественных стран. И разрыв этой связи оказывает сильное негативное влияние на организацию и развитие как уже существующих, так и новых логистических цепочек, что, в свою очередь, влечет за собой потребность в вынужденных организационно-структурных, финансовых, информационных изменениях.

Как показывают события 2022 г., уход западных поставщиков, разрыв традиционных транспортных коридоров (через Европу), введение санкций на поставку определенных категорий оборудования и технологий вынудили российские компании ИСС экстренно перестраивать цепочки поставок, столкнувшись с необходимостью поиска новых поставщиков в странах Азии (Китай, Турция, Индия, Иран) или внутри страны [4].

Как выяснилось в процессе исследования, в результате санкций Россия была вынуждена переориентировать основные грузопотоки с Запада на Восток и Юг. Это знаменовало собой самую значительную реструктуризацию в выстраивании новых логистических маршрутов между государствами в данном направлении¹.

Эволюцию этой концепции можно условно разделить на четыре этапа:

1. Середина 1990–2000-х гг. В этот период формировалась сбалансированная внешняя политика. Под руководством Е.М. Примакова активизировались отношения с восточными странами, особенно с Китаем и Индией. Зарождается концепция стратегического треугольника РИК, создаются предпосылки для формирования БРИКС.

¹ Сергеев А.А. Проблемы развития логистической транспортной системы регионов России в условиях санкций // Общество и экономическая мысль в XXI в.: пути развития и инновации : мат. XIII Междунар. студ. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию Победы в Великой Отечественной войне, 3 апреля 2025 г. / редкол.: Ю.В. Вакулин и др. Воронеж : Воронежский филиал РЭУ имени Г.В. Плеханова, 2025.

2. 2000–2014 гг. Укрепление восточного вектора внешней политики и акцент на развитие Дальнего Востока. Взаимодействие с Китаем стало стратегически важным. России удалось заложить основы для более активного участия в АТЭС и АСЕАН.

3. 2014–2022 гг. Первый украинский кризис привел к изменениям в риторике, ускорив процесс «поворота на Восток» и активизируя сотрудничество с Китаем. Подписаны крупные экономические контракты, включая газопровод «Сила Сибири». Формируется Евразийский экономический союз, расширяются связи с другими странами АТР.

4. После 2022 г. На этом этапе сложно подводить итоги, так как ситуация после начала специальной военной операции в феврале 2022 г. все еще находится в активной фазе. Отношения России со странами Запада продолжают ухудшаться, вводятся новые очередные санкции. Явные тенденции на этом этапе включают:

- углубление восточных связей и исследование новых азиатских рынков;
- перенаправление поставок энергоресурсов в страны Азии и Ближнего Востока;
- установление новых торговых маршрутов и развитие связей с Индией, Китаем, Монголией, Вьетнамом и Сингапуром;
- в 2022 г. Россия стала крупнейшим поставщиком нефти для Индии в импорте;

• VIII Восточный экономический форум стал важной платформой для обсуждения многополярного мира, где подтвердился интерес множества стран к деловым связям с Россией;

• акцент на многосторонней политике, укрепляющей сотрудничество в рамках ЕАЭС, ШОС и БРИКС [5].

В раннем исследовании было установлено, что, согласно онлайн-платформе: The Observatory of Economic Complexity (ОЕС), по итогам 2021 г. Россия экспортировала товаров на сумму 493 млрд долл. После начала санкционной войны общий объем, вопреки всем ожиданиям, вырос на 44 млрд долл. и составил 534 млрд долл.

Рост связан с неподготовленностью некоторых недружественных стран к полному отказу от российских энергоресурсов, к тому же из-за обострения конфликта к зависимости от санкционных товаров добавился повышенный спрос на предметы торговли, не попадавшие на тот момент времени под ограничения. Страны-союзники и участники союза БРИКС воспользовались ситуацией на международной арене, активно увеличив закупки сырья и приняв участие в параллельном импорте, они стали вытеснять бывших основных импортеров (табл. 1)².

² Сергеев А.А., Быковская Е.В., Дмитриева Е.И. Влияние санкций на экспорт и региональные торговые связи России // Modern Economy Success. 2026. № 3. С. 363–375.

Табл. 1. Основные импортеры страны за 2021–2022 гг. (таблица составлена на основе данных ОЕС)

Table 1. The main importers of the country for 2021–2022 (table was compiled using OEC data)

Страна Country	Регион Region	Экспорт 2021 г., млрд долл. Exports in 2021, USD billion	Экспорт 2022 г., млрд долл. Exports in 2022, USD billion	Темп роста, % Growth rate, %
Китай China	Азия Asia	72,1	114	58,1
Нидерланды Netherlands	Европа Europe	39,5	19,7	–50,1
Соединенные Штаты Америки United States of America	Северная Америка North America	27,3	15	–45,1
Великобритания Great Britain	Европа Europe	26,4	6,8	–74,2
Италия Italy	Европа Europe	22,7	28,6	25,9
Беларусь Belarus	Европа Europe	20,5	25,6	24,9
Турция Türkiye	Европа/Азия Europe/Asia	20,2	28,3	40,1
Германия Germany	Европа Europe	19,1	30,9	61,8
Казахстан Kazakhstan	Азия Asia	18,6	17,3	–7
Южная Корея South Korea	Азия Asia	16,9	14,8	–12,4

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Страна Country	Регион Region	Экспорт 2021 г., млрд долл. Exports in 2021, USD billion	Экспорт 2022 г., млрд долл. Exports in 2022, USD billion	Темп роста, % Growth rate, %
Япония Japan	Азия Asia	10,9	14,9	36,7
Франция France	Европа Europe	9,76	15,9	62,9
Бельгия Belgium	Европа Europe	9,0	11,1	23,3
Финляндия Finland	Европа Europe	8,9	5,61	−36,9
Индия India	Азия Asia	7,6	40,4	431,6
Бразилия Brazil	Южная Америка South America	5,6	8,6	53,6

Табл. 2. Основные импортеры страны за 2022–2023 гг. (таблица составлена на основе данных ОЕС)

Table 2. The main importers of the country for 2022–2023 (table was compiled using OEC data)

Страна Country	Регион Region	Экспорт 2022 г., млрд долл. Exports in 2022, USD billion	Экспорт 2023 г., млрд долл. Exports in 2023, USD billion	Темп роста, % Growth rate, %
Китай China	Азия Asia	114	129	13,2
Индия India	Азия Asia	40,4	66,1	63,6
Беларусь Belarus	Европа Europe	25,6	38,6	50,8
Турция Türkiye	Европа/Азия Europe/Asia	28,3	31	9,5
Казахстан Kazakhstan	Азия Asia	17,3	16,1	−7,0
Бразилия Brazil	Южная Америка South America	8,63	11,1	28,6
Гонконг Hong Kong	Азия Asia	1,97	8,26	319,8

В 2023 г. российский экспорт составил 394 млрд долл., больше половины которого пришлось на страны Азии (табл. 2) [6].

Санкционное давление значительно повлияло на торговлю с ЕС, отчего товарооборот практически прекратился. России пришлось искать новые рынки сбыта, поэтому политика «поворот на Восток» стала важной стратегической задачей, в выполнении которой определенную роль должны сыграть предприятия ИСС, в том числе и при создании логистических объектов для новых цепочек поставок. Если не учитывать обход санкций, то страны Азии являются основными рынками сбыта. Особенно выделяются экономические отношения с Китаем и Индией, что позволяет снижать зависимость от стран Европы. Развитие транспортной и логистической инфраструктуры в восточном направлении служит приоритетом в построении «новой логистики»².

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как показывают практика и результаты проводимого исследования, контейнерные перевозки в портах Санкт-Петербурга в апреле 2022 г. находились на уровне немногим более 50 % от среднемесячного объема 2021 г., тогда как порты Дальнего Востока (Владивосток и Находка) в 2023 г. обрабатывали более половины всех контейнерных перевозок. Годовой прирост достиг 34 %. Несмотря на это, порт Новороссийск остается лидером по количеству обработанных грузов. Из-за переориентации торговли на Восток и Юг загрузка портов выросла до 125 % к концу 2022 г., что привело к шестикратному увеличению времени ожидания судов. Еще одной существенной проблемой стало то, что в начале 2022 г. около 40 % контейнеров принадлежало международным компаниям, которые впоследствии ушли с российского

рынка. Ключевую роль в восстановлении контейнеропотока сыграл Китай¹ [7].

В то же время железнодорожная логистика претерпела аналогичную переориентацию на Восток. Во второй половине 2023 г. объем перевозок на Восток (80 млн т) впервые превысил объем перевозок на Запад (76 млн т). Однако, как и в случае с морскими перевозками, инфраструктура оказалась недостаточно оснащена для обработки возросших объемов поставок, что привело к задержкам в доставке грузов² [8].

До начала конфликта с Украиной на автомобильный транспорт приходилось большинство грузоперевозок между Россией и странами ЕС. Однако санкции привели к резкому падению перевозок по этому маршруту на 80 %. Вместе с тем в других регионах появился повышенный спрос на грузовики для так называемых мультимодальных перевозок. Примерами такого типа маршрутов являются перевозки грузов из Китая в Забайкальск: сначала грузы перевозятся по автомобильным дорогам, затем по железной дороге или по морю из китайского порта Далянь, далее автомобильным транспортом до границы в Хэйхэ и наконец по железной дороге доезжают до Москвы. Эксперты Центробанка отмечают, что на отдельных маршрутах объемы автомобильных перевозок выросли в 1,5–3 раза. В целом спрос на автомобильные грузоперевозки за первые шесть месяцев 2023 г. вырос на 61 %, по расчетам биржи ATI.SU, только в мае и июне в годовом выражении он увеличился примерно вдвое. Соответственно, выросли и цены: на самых популярных маршрутах средний рост составил 38 % за год и 10 % за последние три месяца² [9].

В настоящее время есть планы увеличить порттовые мощности на Дальнем Востоке России на треть в течение следующих трех лет. Другие крупные

проекты включают транспортный коридор «Север – Юг» (строится с 1999 г.), который призван соединить Индию, Иран и Россию, а также развитие Байкало-Амурской магистрали (БАМ), Транссибирской железной дороги, а также Северного морского пути² [9].

В табл. 3 представлены данные, иллюстрирующие объемы перевозок за 2022–2023 гг., актуальные проблемы, с которыми сталкивается каждый вид транспорта, а также возникающие в связи с этим тенденции грузоперевозок.

Политика «поворота на Восток» открыла новые возможности для различных видов транспорта, однако из-за возросшей нагрузки и недостаточного развития транспортной инфраструктуры появились соответствующие проблемы: увеличилось время ожидания, возник избыток грузов и вместе с этим рост тарифов. Необходимы значительные инвестиции в логистическую инфраструктуру в восточном направлении. Для успешной реализации данной политики требуется как модернизация существующих объектов, так и строительство новых транспортных коридоров.

Аналогичные проблемы в связи с охарактеризованной выше ситуацией испытывают предприятия ИСС, к числу которых можно отнести:

- рост неопределенности и рисков (новые поставщики не имеют истории надежности);
- удлинение логистических маршрутов и увеличение сроков поставки на 30–50 %;
- рост стоимости логистики (перенаправление грузов через порты Дальнего Востока и южное направление);
- необходимость пересмотра договорных условий и методов обеспечения исполнения (банковские гарантии, факторинг).

Табл. 3. Анализ «поворота на Восток» по основным видам транспорта в России по доставке груза (составлено авторами)
Table 3. Analysis of the “turn to the East” by the main modes of transport in Russia for cargo delivery (compiled by the authors)

Вид транспорта Type of transport	Объемы перевозок (2022–2023) Traffic volumes (2022–2023)	Проблемы и вызовы Problems and challenges	Тенденции Trends
Морской транспорт Sea transport	Контейнерные перевозки в портах Дальнего Востока составили более 50 % от общих объемов; прирост 34 % Container shipments in the ports of the Far East accounted for more than 50 % of the total volume; an increase of 34 %	Недостаточная инфраструктура, 6-кратное увеличение времени ожидания судов Insufficient infrastructure, 6-fold increase in waiting time for ships	Рост порттовых мощностей на Дальнем Востоке на 30 % Port capacity growth in the Far East by 30 %
Железнодорожный транспорт Railway transport	Перевозки на восток (80 млн т) впервые превысили перевозки на запад (76 млн т) Shipments to the east (80 million tons) exceeded shipments to the west (76 million tons) for the first time	Недостаточная инфраструктура, задержки в доставке грузов Insufficient infrastructure, delays in cargo delivery	Увеличение объемов перевозок в связи с ростом спроса Increased traffic volumes due to increased demand
Автомобильный транспорт Road transport	Спрос на грузоперевозки вырос на 61 % в первой половине 2023 г. Cargo transportation demand increased by 61 % in the first half of 2023	Санкции привели к падению объемов перевозок на 80 % в направлении ЕС The sanctions led to an 80 % drop in traffic volumes towards the EU	Рост цен на маршрутах составил 38 % за год The price increase on the routes was 38 % over the year

В этих условиях повышаются требования к гибкости, прозрачности и скорости принятия решений в управлении цепочкой поставок.

В октябре 2023 г. Правительство Абхазии заключило партнерское соглашение с недавно созданной российской компанией Infrastructure Development с целью возрождения деятельности аэропорта Бабушара, расположенного недалеко от Сухуми, столицы Абхазии. Ключевым элементом проекта является новый терминал, который был введен в эксплуатацию в 2025 г., с пропускной способностью 1300 пассажиров в час. Предполагаемая стоимость реконструкции составила 8 млрд руб.¹

Правительство России представило программу развития дорожной инфраструктуры до 2035 г. Инициатива охватывает строительство, реконструкцию и ввод в эксплуатацию региональных дорог и объектов инфраструктуры. Правительство активно финансирует проекты дорожной инфраструктуры в регионах. До конца 2022 г. на ремонт и строительство автодорог в Крыму, Татарстане, Новосибирской области и Камчатском крае дополнительно выделено 10,4 млрд руб. Значительная часть, около 7,3 млрд руб., направлена на строительство моста через р. Обь протяженностью 1,5 км в Новосибирске [10]. Рост торговли с Китаем стимулирует строительство новой инфраструктуры и общее экономическое развитие².

В июле 2024 г. российское правительство объявило об амбициозных планах по созданию международного транспортного коридора (МТК) с бесшовным железнодорожным сообщением от Балтийского и Баренцева морей до Индийского океана. Коридор может сократить время транзита с примерно 45 дней (через Суэцкий канал) до 25 дней и снизить расходы на перевозку до 30 %. Цель проекта — создание комплексной транспортной сети, соединяющей Северную Европу с Персидским заливом и Индийским океаном, с железнодорожным сообщением через Россию и, возможно, другие страны для достижения этих ключевых водных путей² [11].

В мае 2024 г. было объявлено о планах открыть первый терминал сжиженного углеводородного газа (СУГ) на побережье Тихого океана с совместными инвестициями с Китаем к концу 2025 г. Российский фонд прямых инвестиций (РФПИ) в партнерстве с китайской нефтехимической компанией Haiwei профинансирует терминал на Дальнем Востоке России для отгрузки СУГ. Сделка предполагает инвестирование 7 млрд руб. в терминал, годовой объем которого составит 1 млн т. Ожидается, что общий объем инвестиций составит около 30 млрд руб.¹ [12].

Деятельность крупнейших логистических операторов в 2024 г. демонстрирует переход от ситуативного реагирования к стратегическому выстраиванию устойчивых транспортных цепочек, ориентированных на восточное направление. Так, транспортная компания Delko в июне 2024 г. расширила спектр услуг, перейдя от модели доставки до приграничного

склада к организации сквозных (прямых) поставок между китайскими продавцами и российскими покупателями. Интеграция с китайскими перевозчиками позволила компании взять под контроль весь процесс транспортировки: от планирования погрузки до подготовки таможенной документации и информирования клиента. Данный шаг направлен на устранение проблем, характерных для переходного периода 2022–2023 г., таких как неточность документов и потеря контроля над отслеживанием грузов [13].

Схожая стратегия углубления контроля над цепочкой поставок реализуется и в рамках инвестиционных проектов. Группа компаний «Евросиб» на Петербургском международном экономическом форуме (ПМЭФ-2024) заключила соглашение с Газпромбанком о совместном финансировании развития транспортно-логистической инфраструктуры. Инициатива охватывает расширение железнодорожных, портовых и складских мощностей, а также обновление парка подвижного состава. Ключевым проектом в рамках этого партнерства станет создание мультимодального логистического центра в Забайкалье, что должно повысить пропускную способность на ключевом участке российско-китайской границы [14].

Параллельно с развитием наземной и складской инфраструктуры происходит наращивание морских мощностей. Транспортная группа FESCO в мае 2024 г. пополнила свой флот восемью новыми балкерами. Это расширение, увеличивающее потенциал группы в сегменте международных экспортных перевозок, соответствует общей стратегии усиления присутствия российских операторов на морских линиях, которые стали критически важными в условиях переориентации грузопотоков [15].

В инвестиционно-строительной сфере активно развиваются специализированные B2B-маркетплейсы строительных материалов («ТомСтрой», «Стройпортал», SroyMall), логистические агрегаторы (ATI.SU, «Деловые Линии», «ПЭК»), а также платформы для управления проектами и снабжением (Pragmascore, Tangl, PlanRadar). Лидеры отрасли — АО «Мосинжпроект», ГК ФСК, ГК «Самолет» — создают собственные цифровые порталы для взаимодействия с поставщиками, которые позволяют:

- проводить электронные тендеры и запросы коммерческих предложений;
- отслеживать статус заказов в реальном времени;
- обмениваться документами (договоры, счета, акты) в электронном виде;
- интегрировать данные с внутренними ERP и BIM-системами [16].

Как показывают данные по состоянию на 2024 г., полученные в результате ежегодного наблюдения за развитием цифровизации процесса управления цепочек поставок в строительстве, около 40 % строительных организаций среднего и крупного бизнеса (с выручкой свыше 500 млн руб.) внедрили или находятся в процессе внедрения цифровых инструментов

для управления закупками. Однако лишь 15 % из них используют комплексные решения, интегрированные с BIM и ERP. Доля конкурентных закупок (тендеры, запросы котировок, электронные аукционы) в среднем по отрасли не превышает 25 %, что значительно ниже показателей развитых стран (60–70 % в Европе и США) [16].

Описанные выше процессы адаптации протекают в течение 2024 г., однако санкционное давление продолжает усиливаться. Новый пакет ограничений, введенный в январе 2025 г. и нацеленный на энергетический сектор, «теневой флот» и финансовые институты, создает очередной виток турбулентности. Это вынуждает участников рынка вновь возвращаться к поиску решений, сопоставимому по сложности с задачами весны 2022 и 2023 гг., что подтверждает необходимость выработки долгосрочных механизмов защиты логистической устойчивости, рассмотренных далее.

Для минимизации негативных последствий санкционного давления и повышения устойчивости транспортно-логистической системы РФ, оказывающей значительное влияние и на функционирование организаций ИСС, представляется целесообразным сосредоточиться на реализации комплекса мер поддержки, включающего следующие направления:

1. Стимулирование частных инвестиций в транспортную инфраструктуру. Государственная политика должна быть направлена на создание благоприятных регуляторных условий для привлечения внебюджетных средств в строительство железнодорожных и портовых мощностей. Это предполагает разработку механизмов инвестиционных контрактов с разделением ответственности за грузопотоки и проработку моделей возврата вложенных средств. В долгосрочной перспективе передовым инструментом могут стать облигационные займы (в том числе бессрочные) и привлечение средств населения, что потребует соответствующего совершенствования законодательства для снижения рисков инвесторов [17].

2. Развитие и модернизация критической инфраструктуры. Необходима реорганизация и реструктуризация существующих объектов транспортно-логистической системы, а также создание новых мощностей. В качестве меры стимулирования инвестиций в данные объекты может рассматриваться предоставление пролонгированных налоговых льгот [18].

3. Повышение конкурентоспособности МТК «Север – Юг». Для увеличения привлекательности данного маршрута целесообразно внедрение системы тарифных преференций, например поэтапной системы скидок на транзит отдельных категорий грузов (25 % в первые три года, 15 и 10 % в последующие трехлетние периоды с последующим возвратом к стандартным тарифам). Дополнительным конкурентным преимуществом МТК «Север – Юг» является его относительная безопасность по сравнению с традиционными морскими маршрутами,

что особенно актуально в условиях геополитической нестабильности и роста рисков в акватории Черного моря [19].

4. Внедрение инновационных моделей логистического взаимодействия. Перспективным представляется использование механизмов типа «ship or pay» (плати или вези). Эта модель позволяет нивелировать ценовые дисбалансы и обеспечить паритет интересов: грузоотправитель гарантирует оплату согласованных объемов перевозки, а перевозчик — предоставление необходимых мощностей для ее осуществления [20].

5. Внедрение интегрированных платформенных решений в управлении цепочками поставок, в том числе для предприятий ИСС, даст возможность в реальном времени отслеживать рыночные цены, оперативно переключаться между поставщиками, автоматизировать документооборот и прогнозировать риски срывов. Такой переход не только компенсирует негативное влияние внешних факторов, но и создает долгосрочные конкурентные преимущества: снижение себестоимости выполняемых работ, повышение надежности поставок и ускорение оборачиваемости оборотных средств в отношении строительных организаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование подтверждает, что логистическая система России демонстрирует способность к адаптации в условиях беспрецедентного санкционного давления, сформировав основы так называемой «новой логистики». Ее ключевыми характеристиками стали кардинальная географическая переориентация грузопотоков с западного на восточное и южное направления, прежде всего в страны Азии и Китая, что повлекло за собой резкий рост нагрузки на восточную инфраструктуру. Восточный полигон железных дорог и дальневосточные порты столкнулись со значительным увеличением объемов контейнерных перевозок, что актуализировало необходимость срочного расширения и модернизации их мощностей за счет строительства новых объектов. Переориентация грузопотоков также привела к увеличению спроса на автомобильные грузоперевозки, особенно на мультимодальных маршрутах, связывающих Китай и Россию.

В ответ на новые вызовы государство активизировало инвестиции в развитие транспортной инфраструктуры, включая расширение портовых мощностей на Дальнем Востоке, строительство новых дорог и развитие международных транспортных коридоров, таких как «Север – Юг». Одновременно санкционные ограничения выступили катализатором ускоренного развития отечественных цифровых сервисов и интегрированных платформ для управления логистическими процессами, а также способствовали росту электронной коммерции за счет улучшения товарного предложения на внутреннем рынке.

Важно отметить, что активная цифровизация бизнес-процессов в логистике происходит на фоне значительного увеличения тарифов на грузоперевозки. Характерной особенностью «новой логистики» является использование механизмов обхода западных санкций через прокси-государства и прокси-покупателей, что создает как новые экономические возможности, так и сопутствующие риски. В этой связи критически важной задачей становятся укрепление и совершенствование логистической устойчивости, поскольку нарушение цепочек поставок способно привести к экономическому застою, дефициту товаров, росту цен и снижению покупательной способности населения, а также к сбоям в производственных циклах и сокращению прибыли предприятий.

Отдельно следует выделить проблемы управления цепочками поставок в строительстве — длительные циклы закупки (до 30–40 дней), низкая прозрачность, высокий уровень срывов поставок (20–25 %), отсутствие интеграции между подразделениями

и контрагентами, субъективный выбор поставщиков, «слепая зона» в транспортировке. В настоящее время эффективным решением выделенных проблем становится применение цифровых платформ, создающих объективную необходимость и одновременно благоприятные условия для перехода к новым, интегрированным логистическим моделям.

Переориентация региональной экономической и логистической политики на Восток и Юг, ставшая приоритетной после 2022 г., создает основу для появления новых трендов в развитии логистической деятельности через заключение взаимовыгодных контрактов, привлечение инвестиций и активное участие в экономических и политических объединениях. Данный вектор позволяет снизить зависимость от западных стран, повысить технологический суверенитет и в конечном итоге способствует укреплению позиций России на мировой арене в контексте формирования многополярного мира.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Думнов А.А. Классификация санкций и их воздействие на оборонно-промышленный комплекс Российской Федерации // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2020. № 1. С. 13–17. EDN JLQOQI.

2. Сафиуллин М.Р., Ельшин Л.А. Санкционное давление на экономику России: пути преодоления издержек и выгоды конфронтации в рамках импортозамещения // Финансы: теория и практика. 2023. Т. 27. № 1. С. 150–161. DOI: 10.26794/2587-5671-2023-27-1-150-161. EDN QFWSBU.

3. Грачева А.Д. Последствия влияния санкций на российскую промышленность // Промышленность: экономика, управление, технологии. 2023. Т. 2. № 4 (7). С. 36–47. EDN DPXQGF.

4. Скворцова В.А., Скворцов А.О. Антироссийские экономические санкции: последствия и противодействие // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 1 (53). С. 5–19. DOI: 10.21685/2227-8486-2025-1-1. EDN JIYWUW.

5. Лагутина М.Л., Лапенко М.В. Поворот на Восток в контексте внешней политики России: история и современность // Восточный вектор: история, общество, государство. 2023. № 1. С. 23–27. DOI: 10.18101/2949-1657-2023-1-23-37. EDN MZSBSX.

6. Бударина Н.А., Горохова М.К. Динамика экспорта и импорта России в условиях локализации и перемен в направлениях глобальных товаропотоков // Экономика и бизнес: теория и практика. 2023. № 6–1 (100). С. 60–64. DOI: 10.24412/2411-0450-2023-6-1-60-64. EDN ZGOGLO.

7. Павлова В.А. Анализ проблем в сфере контейнерных перевозок на Дальнем Востоке России //

Региональная экономика и управление : электронный научный журнал. 2023. № 3 (75). EDN CPYCQC.

8. Кнобель А.Ю., Фиранчук А.С. Динамика товарооборота России с основными партнерами в 2022 г. // Экономическое развитие России. 2023. Т. 30. № 4. С. 8–14. EDN YESZPL.

9. Гладунов В.А., Бондаренко Е.М. Выбор оптимальных логистических схем поставок товаров из Китая в Российскую Федерацию при использовании контейнеров // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 15–23. DOI: 10.52170/1815-9265_2023_64_15. EDN KHWKOS.

10. Лебедева Н.А. Проблемы и особенности реализации транспортной стратегии Российской Федерации до 2035 года // Научный результат. Экономические исследования. 2023. Т. 9. № 2. С. 74–84. DOI: 10.18413/2409-1634-2022-9-2-0-7. EDN CSIGER.

11. Алиев А.А., Азиев Я.Г., Велиев С.М. Основные преимущества и перспективы международного транспортного коридора «Север – Юг» // Теория и практика современной науки. 2025. № 3 (117). С. 20–23. EDN JOTTCZ.

12. Журавлева Н.А., Крюкова Т.А. Эффект синергии транспортной сопряженности цепей поставок по маршрутам международного транспортного коридора «Север – Юг»: сценарный анализ // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. № 4. С. 141–154. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-142-154. EDN OXPMTY.

13. Ляшенко М.В., Истомин Л.Г., Калмыков С.П., Буднова М.В. Роль международных транспортных коридоров во внешнеторговой деятельности России

и Китая // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16. № 5. EDN FTJWQT.

14. Ковалева И.В. Развитие внешнеэкономической деятельности трансграничных государств в системе международных транспортных коридоров // Инновационная экономика: информация, аналитика, прогнозы. 2024. № 5. С. 234–245. DOI: 10.47576/2949-1894.2024.5.5.028. EDN SAVBTC.

15. Агаева А.Ш., Идрисов Ш.А. Участие России в развитии транспортно-логистических магистралей стран — членов ЕАЭС // Евразийская интеграция: экономика, право, политика. 2024. Т. 18. № 2 (48). С. 26–36. DOI: 10.22394/2073-2929-2024-02-26-36. EDN JREIAC.

16. Дюкова О.М., Локтионова Е.В. Управление цепями поставок в строительстве в условиях цифровизации // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2020. № 2 (122). С. 171–175. EDN EEEZSJ.

17. Покровская О.Д. Развитие логистической транспортной системы России в условиях санкций // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. № 3. С. 58–72. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-58-72. EDN QTHKZC.

18. Содикзода П. Классификация экономических санкций в системе мирохозяйственных связей // Финансово-экономический вестник. 2024. № 3 (42). С. 105–113. EDN ADZHUP.

19. Ушкалова Д.И. Эскалация санкционного давления: новые риски для внешней торговли России // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2024. № 6. С. 24–39. DOI: 10.52180/2073-6487_2024_6_24_39. EDN NBAQQO.

20. Снектор С.В., Назарова Е.А. Секретные соглашения в санкционной экономике // Научные исследования экономического факультета. Электронный журнал. 2023. Т. 15. № 4 (50). С. 51–74. DOI: 10.38050/2078-3809-2023-15-4-51-74. EDN RLIWXW.

Поступила в редакцию 11 марта 2026 г.

Принята в доработанном виде 8 июня 2026 г.

Одобрена для публикации 20 июня 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Елена Викторовна Быковская — доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры менеджмента; Тамбовский технический государственный университет (ТГТУ); 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, помещ. 2; SPIN-код: 8172-7493; bikovskaya.elena@yandex.ru;

Екатерина Игоревна Дмитриева — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и инноваций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 6195-8972, Scopus: 57205223002, ORCID: 0000-0002-7754-0975; dmitrievaei@mgisu.ru;

Валерий Викторович Бирюков — доктор экономических наук, доцент, декан факультета инженерной экономики и менеджмента; Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова (КарТУ); 100027, г. Караганда, пр-т Нурсултана Назарбаева, д. 56, Республика Казахстан; SPIN-код: 1761-4102, Scopus: 56658394100, ResearcherID: GZB-1950-2022, ORCID: 0000-0003-2712-8840; fiem@ktu.edu.kz;

Александр Александрович Сергеев — магистр; Тамбовский технический государственный университет (ТГТУ); 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, помещ. 2; aleksandr45s@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Dumnov A.A. *Sanctions classification and their impact on military — industrial complex of Russian Federation. Scientific Bulletin of the military-industrial complex of Russia*. 2020; 1:13-17. EDN JLQOQI. (rus.).

2. Safiullin M.R., Yelshin L.A. Sanctions pressure on the Russian economy: ways to overcome the costs and benefits of confrontation within the framework of import substitution. *Finance: Theory and Practice*. 2023; 27(1):150-161. DOI: 10.26794/2587-5671-2023-27-1-150-161. EDN QFWSBU. (rus.).

3. Gracheva A.D. Consequences of the impact of sanctions on Russian industry. *Industry: Economics, Management, Technology*. 2023; 2(4):(7):36-47. EDN DPXQGF. (rus.).

4. Skvortsova V.A., Skvortsov A.O. *Anti-Russian economic sanctions: consequences and counteraction. Models, Systems, Networks in Economics, Engineering, Nature and Society*. 2025; 1(53):5-19. DOI: 10.21685/2227-8486-2025-1-1. EDN JIYWYU. (rus.).

5. Lagutina M.L., Lapenko M.V. Turn to the east in the context of Russia's foreign policy: the past and the present. *Eastern Vector: History, Society, State*. 2023; 1:23-27. DOI: 10.18101/2949-1657-2023-1-23-37. EDN MZSBSX. (rus.).

6. Budarina N.A., Gorokhova M.K. The dynamics of Russia's exports and imports under conditions of localisation and changes in the direction of global trade flows. *Economics and Business: Theory and Practice*.

2023; 6-1(100):60-64. DOI: 10.24412/2411-0450-2023-6-1-60-64. EDN ZGOGLO. (rus.).

7. Pavlova V.A. Analysis of the Russian far east container shipping problems. *Regional economics and management: electronic scientific journal*. 2023; 3(75). EDN CPYCQC. (rus.).

8. Knobel A.Yu., Firanchuk A.S. Dynamics of trade turnover between Russia and its main partners in 2022. *Russian Economic Developments*. 2023; 30(4):8-14. EDN YESZPL. (rus.).

9. Gladunov V.A., Bondarenko E.M. The choice of optimal logistics schemes for the supply of goods from China to the Russian Federation using containers. *Bulletin of the Siberian State University of Railway Communications*. 2023; 1(64):15-23. DOI: 10.52170/1815-9265_2023_64_15. EDN KHWKOS. (rus.).

10. Lebedeva N.A. Problems and features of transport strategy of the Russian Federation implementation of the until 2035. Scientific Result. *Economic Research*. 2023; 9(2):74-84. DOI: 10.18413/2409-1634-2022-9-2-0-7. EDN CSIGER. (rus.).

11. Aliyev A.A., Haziyeve Y.H., Veliyev S.M. Main advantages and prospects of the international transport corridor "North – South". *Theory and Practice of Modern Science*. 2025; 3(117):20-23. EDN JOTTCZ. (rus.).

12. Zhuravleva N., Kryukova T. The synergy effect of transport connectivity of supply chains along the routes of the international transport corridor "North – South" : scenario analysis. *Bulletin of Scientific Research Results*. 2024; 4:141-154. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-142-154. EDN OXPMTY. (rus.).

13. Lyashenko M.V., Istomin L.G., Kalmykov S.P., Budnova M.V. The role of international transport corridors in the foreign trade activities of Russia and Chi-

na. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024; 16(5). EDN FTJWQT. (rus.).

14. Kovaleva I.V. Development of foreign economic activities of cross-border states in the system of international transport corridors. *Innovative Economy: Information, Analytics, Forecasts*. 2024; 5:234-245. DOI: 10.47576/2949-1894.2024.5.5.028. EDN SAVBTC. (rus.).

15. Agaeva A.Sh., Idrisov Sh.A. Russia's participation in the development of transport and logistics highways of the EAEU member states. *Eurasian Integration: Economics, Law, Politics*. 2024; 18(2):48:26-36. DOI: 10.22394/2073-2929-2024-02-26-36. EDN JREIAC. (rus.).

16. Dyukova O.M., Loktionova E.V. Supply chain management in construction in terms of digitalization. *Proceedings of the St. Petersburg State University of Economics*. 2020; 2(122):171-175. EDN EEEZSJ. (rus.).

17. Pokrovskaya O.D. Development of Russia's logistics transport system under sanctions. *Bulletin of Scientific Research Results*. 2023; 3:58-72. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-58-72. EDN QTHKZC. (rus.).

18. Sodiqzoda P. Classification of economic sanctions in the system of global economic relations. *Financial and Economic Bulletin*. 2024; 3(42):105-113. EDN ADZHUP. (rus.).

19. Ushkalova D.I. Escalation of sanctions pressure: new risks for Russia's foreign trade. *Vestnik Instituta Ekonomiki Rossiyskoy Akademii Nauk*. 2024; 6: 24-39. DOI: 10.52180/2073-6487_2024_6_24_39. EDN NBAQQO. (rus.).

20. Spektor S.V., Nazarova E.A. Secret agreements in sanctioned economies. Scientific Research of Faculty of Economics. *Electronic Journal*. 2023; 15(4):(50): 51-74. DOI: 10.38050/2078-3809-2023-15-4-51-74. EDN RLIWXW. (rus.).

Received March 11, 2026.

Adopted in revised form on June 8, 2026.

Approved for publication on June 20, 2026.

B I O N O T E S: **Elena V. Bykovskaya** — Doctor of Economics Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Management; **Tambov State Technical University**; room 2, 106/5 Sovetskaya st., Tambov, 392000, Russian Federation; SPIN-code: 8172-7493; bikovskaya.elena@yandex.ru;

Ekaterina I. Dmitrieva — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 6195-8972, Scopus: 57205223002, ORCID: 0000-0002-7754-0975; dmitrievaei@mgsu.ru;

Valerij V. Biryukov — Doctor of Economics, Associate Professor, Dean of the Faculty of Engineering Economics and Management; **Abylka Saginov Karaganda Technical University**; 56 Nursultan Nazarbayev avenue, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan; SPIN-code: 1761-4102, Scopus: 56658394100, ResearcherID: GZB-1950-2022, ORCID: 0000-0003-2712-8840; fiem@ktu.edu.kz;

Aleksandr A. Sergeev — master's degree; **Tambov State Technical University**; room 2, 106/5 Sovetskaya st., Tambov, 392000, Russian Federation; aleksandr45s@gmail.com.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника). Все иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Файлы растровых изображений должны предоставляться с разрешением не менее 300 dpi, размером не менее 1200 × 1200 px, в файлах формата .jpg, .tiff. Графики, чертежи и иллюстрации, созданные с помощью программ векторной графики (CorelDraw, Excel, Adobe Illustrator и прочих), следует экспортировать в PDF-файл из этой программы (предпочтительно), либо предоставлять исходник в формате той программы, в которой они созданы. Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подписи рисунков и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В Сведениях об авторах (Bionotes) представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотечных депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в

тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия^{2...}

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. **См. рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Abstract (200–250 слов)**Introduction:** text, text, text.**Materials and methods:** text, text, text.**Results:** text, text, text.**Conclusions:** text, text, text.**Key words:** text, text, text.**Acknowledgements:** text, text, text.**Corresponding author:** Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНиП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке источников сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в

статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями **ГОСТа Р 7.0.5–2008**.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Вклад авторов: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В.В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Biographies: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

Contribution of the authors: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д. / conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, supervision etc.) на английском языке.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

ДЛЯ ЗАМЕТОК



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 0000000000000000000000000000130

ОКТМО 45365000

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2026 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги руб. коп.

Итого руб. коп. « » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Квитанция

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 004525988

КБК 0000000000000000000000000000130

ОКТМО 45365000

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2026 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги руб. коп.

Итого руб. коп. « » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

