

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 21. Выпуск 6
2026**

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

Сквозной номер 211

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 21. Issue 6
2026**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 24-76
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	29.06.2026.
Подписан в свет	30.06.2026.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 23,95. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 184

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

строительный факультет, Республика Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: Алла Русланбековна Табекова

Редактор: Татьяна Владимировна Бердникова

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Дизайн и верстка: Алина Юрьевна Байкова

Перевод на английский язык: Ольга Валерьевна Юденкова

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	30.06.2026

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszkuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Executive editor: *Alla R. Tabekova*

Corrector: *Oksana V. Ermikhina*

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova*

Layout: *Alina Y. Baykova*

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

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

А.О. Ильюшенков
Расчетная длина центрально-сжатой двутавровой колонны с линейно изменяющейся высотой стенки . . . 885

Ю.В. Азарова, Д.Н. Казаков, В.А. Бунин, С.В. Кузнецов
Гармонический осциллятор Дуффинга. Эволюция аттрактора 898

Р.Н. Никоноров, У.О. Московкина, Е.А. Софронова
Численное моделирование укрепления береговой линии реки Волги для обустройства пешеходной дорожки к водоему 906

Р.А. Мангушев, М.С. Дружинин
Методика учета влияния вдавливания призматических железобетонных свай на напряженно-деформированное состояние грунтового основания 922

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А.А. Павловская, А.О. Носова, М.В. Успенская
Композиционный бетон с применением вторичного полимерного сырья: систематический обзор. 931

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Н.Т. Фам
Размыв берегов рек: современное состояние исследований. 964

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Ю.А. Рыльцева
Биоинженерные сооружения как элемент управления поверхностным стоком городских территорий 976

В.Р. Чупин, И.А. Абросимова, Р.Н. Ярыгин
Минимизация рисков при обосновании структуры и параметров перспективных систем подачи и распределения воды 991

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.А. Муря, А.Ю. Пономарев
Оптимизация параметров технологических процессов и систем организации строительства портовых объектов 1001

В.В. Сокольников
Обеспечение организационно-технологической надежности строительства на этапе разработки и экспертизы проекта организации строительства (проекта организации работ) 1009

М.В. Гуреев, В.И. Волощук
Оптимизация размещения зданий на участках сложной формы методами искусственного интеллекта. 1025

Н.Г. Верстина, Н.Н. Щепкина, В.С. Цура
Разработка подхода к интегральной оценке рисков проектов формирования парковочных пространств в мегаполисе 1041

Требования к оформлению научной статьи 1069

CONTENTS

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

Alexander O. Ilyushenkov
Effective length of web-tapered pinned I-section column 885

Yulia V. Azarova, Daniil N. Kazakov, Vladimir A. Bunin, Sergey V. Kuznetsov
Duffing harmonic oscillator. Evolution of the attractor 898

Roman N. Nikonorov, Ulyana O. Moskovkina, Ekaterina A. Sofronova
**Numerical modeling of Volga River bank stabilization for the development of a pedestrian path
to the water body 906**

Rashid A. Mangushev, Mikhail S. Druzhinin
**Methodology for Assessing the Effect of Jacked Prismatic Reinforced Concrete Piles on the Stress–Strain
State of Foundation Soils. 922**

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Anastasiya A. Pavlovskaya, Anastasiia O. Nosova, Mayya V. Uspenskaya
Concrete composites incorporating recycled polymer materials: a systematic review 931

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Pham Ngoc Tinh
Riverbank erosion: a state-of-the-art review 964

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Yuliya A. Ryltseva
Bioengineering structures as an element of surface runoff management in urban areas 976

Viktor R. Chupin, Ivanna A. Abrosimova, Roman N. Yarygin
**Risk-Based Justification of the Structure and Parameters of Advanced Water Supply
and Distribution Systems 991**

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Vadim A. Murya, Alexei Yu. Ponomarev
**Optimization of process parameters and construction management systems
for port facilities 1001**

Vladimir V. Sokolnikov
**Ensuring the organizational and technological reliability of construction during the development
and expert review of a construction organization project (work organization project). 1009**

Mikhail V. Gureev, Vadim I. Voloshchuk
Optimization of building placement on irregularly shaped land plots using artificial intelligence methods. 1025

Natalia G. Verstina, Natalia N. Shchepkina, Vladimir S. Tsura
**An integrated risk assessment approach for parking space development projects
in a megacity 1041**

Requirements for research paper design 1069

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.075.4

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.885-897

Расчетная длина центрально-сжатой двутавровой колонны с линейно изменяющейся высотой стенки

Александр Олегович Ильюшенко

Территориальный проектный институт «Хабаровскпромпроект» (ТПИ «Хабаровскпромпроект»);
г. Хабаровск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлен комплексный аналитический анализ потери устойчивости двутавровых колонн с линейно изменяющейся высотой стенки по длине. Решения получены в замкнутом виде с помощью аналитического метода Бубнова – Галеркина и прямого интегрирования дифференциального уравнения изогнутой оси стержня. Проверяется эффективность метода Бубнова – Галеркина для решения задачи о нахождении коэффициента расчетной длины шарнирно-опертой центрально-сжатой колонны переменной жесткости. Также предлагаются альтернативный взгляд на проблему потери устойчивости колонны переменной жесткости и дополнение решения путем пересмотра базисной функции, основанной на параметре ψ_1 . Такой подход решения образует независимый взгляд на анализ задачи потери устойчивости двутавровых колонн с конической стенкой. Полученные значения коэффициента расчетной длины оказываются близкими друг к другу, а средняя относительная погрешность не превышает 5 %.

Материалы и методы. Использованы аналитический метод Бубнова – Галеркина и прямое интегрирование дифференциального уравнения.

Результаты. На основе аналитических методов получены уравнения коэффициента расчетной длины двутавровой колонны переменной жесткости в замкнутой форме. Всего представлены три формулы для расчета.

Выводы. Предлагаемые формулы коэффициента расчетной длины позволяют выполнить расчет шарнирно-опертой двутавровой колонны с линейно изменяющейся высотой стенки по длине на устойчивость. Результаты исследования также содержат дополнительную информацию о внецентренно-нагруженных двутавровых элементах с конической стенкой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: упругая потеря устойчивости, элемент переменной жесткости, двутавровая колонна, параметр высоты, базисная функция, метод Бубнова – Галеркина, коэффициент расчетной длины

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ильюшенко А.О. Расчетная длина центрально-сжатой двутавровой колонны с линейно изменяющейся высотой стенки // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 6. С. 885–897. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.885-897

Автор, ответственный за переписку: Александр Олегович Ильюшенко, revivaltree@gmail.com.

Effective length of web-tapered pinned I-section column

Alexander O. Ilyushenkov

Territorial Design Institute “Khabarovskpromproekt”; Khabarovsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This paper presents a comprehensive analytical study of the buckling of I-section columns with web depth varying linearly along the column length. Closed-form solutions were obtained using the analytical Bubnov – Galerkin method and direct integration of the differential equation of the deflected axis for the member. The effectiveness of the Bubnov – Galerkin method is assessed for determining the effective length factor of a pinned centrally compressed column with variable stiffness. An alternative view of the buckling problem for a variable-stiffness column is also proposed, and the solution is supplemented by reconsidering the basis function based on parameter ψ_1 . This approach provides an independent analysis of the buckling problem of I-section columns with a tapered web. The obtained values of the effective length factor are close to each other, and the mean relative error does not exceed 5 %.

Materials and methods. The analytical Bubnov – Galerkin method and direct integration of the differential equation were used.

Results. Using analytical methods, closed-form equations for the effective length factor of an I-section column with variable stiffness were obtained. In total, three calculation formulas are presented.

Conclusions. The proposed formulas for the effective length factor make it possible to perform a stability calculation of a pinned I-section column with linearly varying web depth along its length. The study also provides additional information on eccentrically loaded I-section members with a tapered web.

KEYWORDS: elastic buckling, variable-stiffness member, I-section column, depth parameter, basis function, Bubnov – Galerkin method, effective length factor

FOR CITATION: Ilyushenkov A.O. Effective length of web-tapered pinned I-section column. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(6):885-897. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.885-897 (rus.).

Corresponding author: Alexander O. Ilyushenkov, revivaltree@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос устойчивости центрально-сжатых стержней переменной жесткости можно считать хорошо изученным. Два больших труда, написанные А.Н. Динником [1] и А.Р. Ржаницыным [2], позволяют в полной мере исследовать конкретику данной задачи. В книге Ф. Блейха [3] также уделено некоторое внимание стержням переменной жесткости.

А.Ф. Смирнов [4] рассматривает устойчивость стержней с непрерывно меняющейся жесткостью, решает дифференциальное уравнение в функциях Бесселя и приводит сводную таблицу решений в элементарных функциях при разных степенях закона изменения жесткости. В.Е. Gatewood [5] также решает приближенное дифференциальное уравнение изогнутой оси с помощью функций Бесселя. Т.А. Branch [6] представляет краткую справку об основных методах решения задачи устойчивости центрально-сжатого стержня переменной жесткости, включая работу А.Н. Динника, а также сравнительную таблицу значений критических сил, вычисленных аналитическим и численным способами.

Л.М. Каган-Розенцвейг [7] считает, что решение задачи об устойчивости стержня переменного сечения получить в замкнутом виде можно лишь для частных законов изменения жесткости. Известно, что при рассмотрении стержня с переменной жесткостью, или конического стержня, необходимо задаться законом изменения жесткости. Формулировка закона зависит от: граничных условий; вида профиля и поперечного сечения; линейного, либо параболического изменения высоты сечения профиля по длине.

Бифуркационную задачу о потере устойчивости центрально-сжатого стержня с переменной жесткостью возможно решить любым из известных аналитических методов. В текущем исследовании использованы метод Бубнова – Галеркина и метод прямого интегрирования дифференциального уравнения, который следует считать точным. Для детального изучения аналитических методик расчета центрально-сжатого стержня постоянной и переменной жесткости достаточно применять специальный курс по строительной механике В.А. Киселева [8].

В статье [9] Н.К. Снитко предлагает исследовать устойчивость стержней переменного сечения при любом законе изменения жесткости путем разделения его на ряд конечных элементов постоянного сечения. Таким образом предлагается перейти от стержня с непрерывной переменной жесткостью к многоступенчатому стержню. Уравнение изогнутой

оси интегрируется по методу начальных параметров, что позволяет получить уравнение прогиба в замкнутой форме. Точность решения зависит от количества учитываемых слагаемых в ряде.

Ю.Э. Сеницкий и А.С. Ишутин [10] рассматривают устойчивость составного стержня переменной жесткости, изменяющегося по степенному закону с учетом деформаций поперечного сдвига. Авторы статьи используют прием, основанный на повышении порядка разрешающего дифференциального уравнения. Это дает возможность проанализировать набор разных случаев закрепления стержня, например шарнирно-опертая решетчатая стрела крана или уголкового опора линий электропередач. Решения для несимметричных форм потери устойчивости получены в цилиндрических функциях (функции Бесселя), а для симметричных форм потери устойчивости и квадратичного закона изменения жесткости в элементарных функциях (уравнение Эйлера).

В книге П.И. Алексеева [11] рассмотрен графоаналитический метод определения устойчивости центрально-сжатого и изгибаемого стержня переменного сечения. Метод основан на математической аналогии между решением, полученным А.Н. Динником, и нахождением частоты колебания струны переменной жесткости, найденной М.Г. Крейном при граничных условиях, описывающих шарнирно опертый стержень, натянутый единичной силой. Критические значения сил сжатого и изгибаемого стержня определяются суммированием площадей эпюр по результатам графической интерпретации интегралов. Метод позволяет учитывать влияние ослабления сечения отверстиями. М.Г. Salvadori [12] решает задачу численным способом методом конечных разностей. М. Eisenberger и R. Cohen [13] решают задачу методом конечных элементов для 12 случаев закрепления. Дополнительно перечислим некоторые из работ, где были предложены формулировки упругой критической силы стержня переменной жесткости: М.А. Hirt и соавт. [14], G.C. Lee [15], А.М. Baptista и соавт. [16], V. Sapalas и соавт. [17], W.G. Smith [18], J.C. Eymouros [19, 20].

Цель настоящего исследования — показать разрешение вопроса устойчивости с помощью аналитического метода Бубнова – Галеркина, но с видоизмененной базисной функцией. На основании существующих работ и решений производится сравнительный анализ. Приводится новая формулировка коэффициента расчетной длины шарнирно опертого двутаврового стержня переменной жесткости, которая в целом по-

может взглянуть на проблему устойчивости стержней переменной жесткости иначе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчетная схема рассматриваемой колонны показана на рис. 1. Начало отсчета $z = 0$ принято при наибольшем поперечном сечении колонны h_1 и моменте инерции $I_{x,1}$. Изменение момента инерции для симметричных стержней с непрерывно меняющейся жесткостью по длине подчинено квадратично-му закону [4]:

$$I_{x,z} = I_{x,1}(1 - bz)^2, \quad (1)$$

где $b = (1 - t_h)/l$; $t_h = \sqrt{I_{x,0}/I_{x,1}}$ — параметр переменности; l — длина стержня.

Приближенное дифференциальное уравнение изогнутой оси двутавровой колонны с линейно изменяющейся высотой стенки по длине с учетом изменения момента инерции $I_{x,z}$:

$$(1 - bz)^2 \eta^{IV} + k^2 \eta'' = 0, \quad (2)$$

где $k^2 = P/EI_{x,1}$.

Выражение (2) — это дифференциальное уравнение задачи устойчивости внецентренно и центрально-сжатого стержня по изгибной форме. Части системы трех дифференциальных уравнений задачи пространственной устойчивости стержня переменной жесткости [21] впервые получены Z. Cywinski [22] на основании уточнений технической теории В.З. Власова [23].

Произведем замену производной переменной $\frac{dz}{dy} = \frac{dy}{dt}$ и приведем дифференциальное уравнение (2)

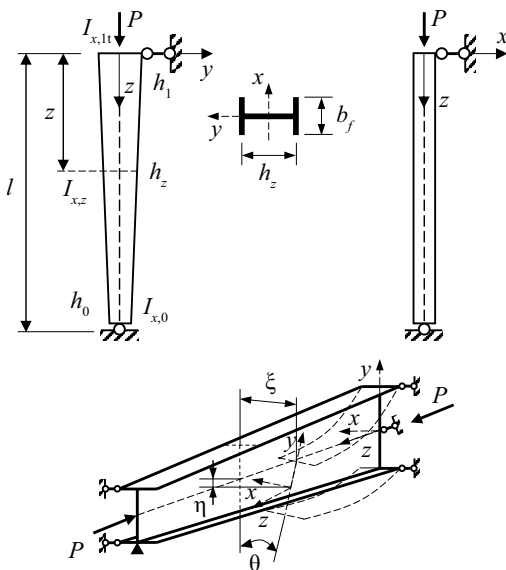


Рис. 1. Шарнирно-опертая двутавровая колонна с линейно изменяющейся высотой стенки

Fig. 1. Web-tapered I-section column

к его характеристической форме. Для этого обозначим $e' = 1 - bz$, тогда:

$$dz = \left(\frac{1 - e'}{b} \right)' dt \rightarrow \frac{dz}{dt} = \frac{e'}{b}. \quad (3)$$

Уравнение (2) обладает свойством понижения степени. Поэтому будет достаточным найти первую и вторую производные с новой переменной:

- первая производная. Умножим и разделим на dt и подставим выражение (3):

$$\begin{aligned} \eta' &= \frac{dy}{dz} = \frac{dy}{dt} \frac{dt}{dz} = \frac{dy/dt}{dz/dt} = \\ &= \frac{dy/dt}{e'/b} = be^{-t} \frac{dy}{dt}; \end{aligned} \quad (4)$$

- вторая производная. Отталкиваемся от найденной первой производной:

$$\eta'' = b^2 e^{-2t} \left(\frac{d^2 y}{dt^2} - \frac{dy}{dt} \right). \quad (5)$$

Подставим производные (4) и (5) в новых переменных в дифференциальное уравнение (2):

$$e^{2t} b^2 e^{-2t} \left(\frac{d^2 y}{dt^2} - \frac{dy}{dt} \right) + k^2 y = 0. \quad (6)$$

Сократим e^{2t} и e^{-2t} . Получим полное квадратное уравнение вида:

$$y'' - y' + k^2 b^{-2} y = 0. \quad (7)$$

Его характеристическая форма:

$$\lambda^2 - \lambda + k^2 b^{-2} = 0. \quad (8)$$

При решении задачи методом Бубнова – Галеркина будем пользоваться уравнением (2), а в методе непосредственного интегрирования выражением (8).

В аналитическом методе Бубнова – Галеркина следует задаться рядом. В самом общем случае:

$$y = \sum_{i=1}^n A_i \varphi_i(z), \quad (9)$$

где A_i — неизвестные постоянные коэффициенты; $\varphi_i(z)$ — функция, удовлетворяющая граничным условиям задачи.

Если ряд (9) подставить в дифференциальное уравнение плоской формы потери устойчивости центрально-сжатого стержня (2), должно получиться тождество:

$$EI_{x,1} \sum_{i=1}^n f_i A_i \varphi_i^{IV}(z) + P \sum_{i=1}^n A_i \varphi_i''(z) = 0, \quad (10)$$

где $f_i = (1 - bz)^2$; $t_h = \sqrt{I_{x,0}/I_{x,1}}$.

Тождество (10) не будет нарушено в том случае, если его умножить на любую функцию $\varphi_k(z)$ и составить интеграл по всей длине стержня:

$$\begin{aligned} \int_0^l \left(EI_{x,1} \sum_{i=1}^n f_i A_i \varphi_i^{IV}(z) + P \sum_{i=1}^n A_i \varphi_i''(z) \right) \times \\ \times \varphi_k(z) dz = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Равенство (11) справедливо при любом $k = 1, 2, \dots, n$.

В канонической форме:

$$c_{k1}A_1 + c_{k2}A_2 + c_{k3}A_3 + \dots + c_{kn}A_n = 0, \quad (12)$$

где $c_{ki} = \int_0^l (EI_{x,1} f_i \varphi_i^{IV}(z) + P \varphi_i''(z)) \varphi_k(z) dz$.

Если решение дифференциального уравнения представляется рядом, включающим только первое слагаемое, тогда:

$$c_{11}A_1 = 0. \quad (13)$$

В самом общем случае, когда принимается несколько функций, уравнения получаются однородными. Поэтому в итоге возникает система из n -го числа алгебраических уравнений устойчивости при неизвестных коэффициентах:

$$\begin{cases} c_{11}A_1 + c_{12}A_2 + c_{13}A_3 + \dots + c_{1n}A_n = 0 \\ \dots \\ c_{n1}A_1 + c_{n2}A_2 + c_{n3}A_3 + \dots + c_{nn}A_n = 0 \end{cases}. \quad (14)$$

Ее удобно решать путем приравнивания определителя к нулю размером $[n \times n]$:

$$D = \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{1n} \\ c_{21} & \dots & c_{2n} \\ c_{n1} & \dots & c_{nn} \end{vmatrix} = 0. \quad (15)$$

Для шарнирно опертого стержня при возможности свободно закручиваться (без стеснения деформации) за базисную функцию обычно принимается ряд синуса:

$$\varphi_k(z) = A_1 \sin \frac{\pi z}{l} + A_2 \sin \frac{2\pi z}{l} + \dots + A_i \sin \left(\frac{i\pi z}{l} \right). \quad (16)$$

Производные при удержании четырех слагаемых в ряде (16):

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n=4} \eta_i'' = \eta_1'' + \eta_2'' + \eta_3'' + \eta_4'' \\ \sum_{i=1}^{n=4} \eta_i^{IV} = \eta_1^{IV} + \eta_2^{IV} + \eta_3^{IV} + \eta_4^{IV} \end{cases}, \quad (17)$$

где $\eta_1^{IV} = A_1 \frac{\pi^4}{l^4} \sin \left(\frac{\pi z}{l} \right);$

$$\eta_1'' = -A_1 \frac{\pi^2}{l^2} \sin \left(\frac{\pi z}{l} \right);$$

$$\eta_2^{IV} = A_2 \frac{16\pi^4}{l^4} \sin \left(\frac{2\pi z}{l} \right);$$

$$\eta_2'' = -A_2 \frac{4\pi^2}{l^2} \sin \left(\frac{2\pi z}{l} \right);$$

$$\eta_3^{IV} = A_3 \frac{81\pi^4}{l^4} \sin \left(\frac{3\pi z}{l} \right);$$

$$\eta_3'' = -A_3 \frac{9\pi^2}{l^2} \sin \left(\frac{3\pi z}{l} \right);$$

$$\eta_4^{IV} = A_4 \frac{256\pi^4}{l^4} \sin \left(\frac{4\pi z}{l} \right);$$

$$\eta_4'' = -A_4 \frac{16\pi^2}{l^2} \sin \left(\frac{4\pi z}{l} \right).$$

Коэффициент канонического уравнения в безразмерной форме в уравнении (12):

$$A_i c_{ki} = A_i \left(\frac{i^4 \pi^4}{l^4} EI_{x,1} \int_0^1 (1 - (1 - t_h) \xi)^2 \times \right. \\ \left. \times \sin(i\pi \xi) \sin(k\pi \xi) d\xi - \right. \\ \left. - P \frac{i^2 \pi^2}{l^2} \int_0^1 \sin(i\pi \xi) \sin(k\pi \xi) d\xi \right), \quad (18)$$

где k — номер строки; i — номер столбца; $\xi = z/l$.

Для главных диагональных членов матрицы (15) решение интегралов приводит к следующему выражению:

$$A_i c_{ki} = A_i \left(\frac{i^4 \pi^4}{l^4} EI_{x,1} a_{ki} \frac{l}{2} - P \frac{i^2 \pi^2}{l^2} \frac{l}{2} \right) = \\ = A_i \left(i^4 \frac{\pi^2 EI_{x,1}}{l^2 P} a_{ki} - i^2 \right). \quad (19)$$

Для остальных членов матрицы (15):

$$A_i c_{ki} = A_i \frac{i^4 \pi^4}{l^4} EI_{x,1} a_{ki} \frac{l}{2} - 0 = A_i i^4 \frac{\pi^2 EI_{x,1}}{l^2 P} a_{ki}, \quad (20)$$

где $a_{ki}(t_h)$ — коэффициенты редукции (переменности), зависящие от t_h в форме квадратичных полиномов.

В методе непосредственного интегрирования дифференциального уравнения задаемся поиском некоторого состояния системы на границе устойчивости. В комплексном случае квадратное уравнение (8) имеет решение:

$$\lambda_{1,2} = \alpha \pm i\beta = 0,5 \pm i\sqrt{(k^2/b^2) - 0,25}. \quad (21)$$

Характеристическое уравнение имеет простые комплексно-сопряженные корни. α и β — это действительные числа, а $i = -\sqrt{1}$. Им соответствуют комплексные решения:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \alpha - i\beta \\ \lambda_2 = \alpha + i\beta \end{cases} \rightarrow \begin{cases} y_1 = e^{\lambda_1 z} = e^{(\alpha - i\beta)z} \\ y_2 = e^{\lambda_2 z} = e^{(\alpha + i\beta)z} \end{cases}. \quad (22)$$

На основании третьей теоремы о свойствах решений линейного однородного уравнения будем иметь так же и действительные решения. Решим линейную комбинацию и подставим полученные комплексные решения:

$$\begin{cases} \bar{y}_1 = \frac{1}{2}(y_1 + y_2) \\ \bar{y}_2 = \frac{1}{2}(y_1 - y_2) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \bar{y}_1 = \frac{1}{2}(e^{(\alpha - i\beta)z} + e^{(\alpha + i\beta)z}) \\ \bar{y}_2 = \frac{1}{2}(e^{(\alpha - i\beta)z} - e^{(\alpha + i\beta)z}) \end{cases}. \quad (23)$$

Между показательной функцией e^z и тригонометрическими функциями $\sin z$ и $\cos z$ имеется связь. Пусть $z = it$ и t — комплексное число. Получим уравнения Эйлера:

$$\begin{cases} e^{it} = \cos t + i \sin t \\ e^{-it} = \cos t - i \sin t \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \sin t = \frac{e^{it} - e^{-it}}{2i} \\ \cos t = \frac{e^{it} + e^{-it}}{2} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \bar{y}_1 = e^{\alpha t} \cos \beta t \\ \bar{y}_2 = e^{\alpha t} \sin \beta t \end{cases} \quad (24)$$

Тогда решение уравнения (8):

$$y(z) = \bar{y}_1 + \bar{y}_2 = C_1 e^{\alpha t} \cos(\beta t) + C_2 e^{\alpha t} \sin(\beta t). \quad (25)$$

В выражении (25) выполняем обратную замену $z = e^t \rightarrow t = \ln z$ и $e^{\alpha t} = e^{0,5t} = z^{0,5} = \sqrt{z}$, получаем уравнение прогиба стержня с двумя постоянными неизвестными коэффициентами C_1, C_2 , зависящими от граничных условий:

$$y(z) = C_1 \sqrt{v} \cdot \cos[\beta \cdot \ln(v)] + C_2 \sqrt{v} \cdot \sin[\beta \cdot \ln(v)], \quad (26)$$

где $\beta = \sqrt{(k^2/b^2) - 0,25}$ — параметр переменности, связанный с критическим параметром нагружения k^2 ; $v = 1 - bz$; $b = (1 - t_h)/l$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В методе Бубнова – Галеркина решаем поочередно определитель матрицы $[2 \times 2]$, $[3 \times 3]$ и $[4 \times 4]$ с тем, чтобы проследить влияние увеличения слагаемых ряда (16) на точность вычисления коэффициента расчетной длины μ . Коэффициенты переменности представляют собой простые квадратичные функции в зависимости от переменности момента инерции t_h по концам стержня:

$$D = \begin{vmatrix} \frac{a_{11}}{a_{cr,1}} - 1 & 16 \frac{a_{12}}{a_{cr,1}} & 81 \frac{a_{13}}{a_{cr,1}} & 256 \frac{a_{14}}{a_{cr,1}} \\ \frac{a_{21}}{a_{cr,1}} & 16 \frac{a_{22}}{a_{cr,1}} - 4 & 81 \frac{a_{23}}{a_{cr,1}} & 256 \frac{a_{24}}{a_{cr,1}} \\ \frac{a_{31}}{a_{cr,1}} & 16 \frac{a_{32}}{a_{cr,1}} & 81 \frac{a_{33}}{a_{cr,1}} - 9 & 256 \frac{a_{34}}{a_{cr,1}} \\ \frac{a_{41}}{a_{cr,1}} & 16 \frac{a_{42}}{a_{cr,1}} & 81 \frac{a_{43}}{a_{cr,1}} & 256 \frac{a_{44}}{a_{cr,1}} - 16 \end{vmatrix} = 0, \quad (27)$$

где $a_{11} = 0,283t_h^2 + 0,434t_h + 0,283$; $a_{12} = a_{21} = -0,18t_h^2 + 0,18$; $a_{22} = 0,32t_h^2 + 0,36t_h + 0,32$; $a_{13} = a_{31} = 0,038t_h^2 - 0,076t_h + 0,038$; $a_{23} = a_{32} = -0,195t_h^2 + 0,195$; $a_{33} = 0,328t_h^2 + 0,344t_h + 0,328$; $a_{14} = a_{41} = -0,0144t_h^2 + 0,0144$; $a_{24} = a_{42} = 0,045t_h^2 - 0,09t_h + 0,045$; $a_{34} = a_{43} = -0,199t_h^2 + 0,199$ и $a_{44} = 0,33t_h^2 + 0,34t_h + 0,33$ — коэффициенты редукции; $t_h = \sqrt{I_{x,0}/I_{x,1}}$; $a_{cr,1} = P/P_{cr,1}$ — упругий коэффициент запаса устойчивости; $P_{cr,1} = (\pi^2 EI_{x,1})/l^2$ — упругая критическая сила при наибольшей изгибной жесткости.

Решение уравнения при удержании только первого слагаемого в выражении (13):

$$\frac{a_{11}}{a_{cr,1}} = 1 \rightarrow P_{cr,t_h} = \frac{\pi^2 EI_{x,1}}{l^2} a_{11} = P_{cr,1} a_{11}. \quad (28)$$

В методе непосредственного интегрирования дифференциального уравнения подставляем граничные условия шарнирно опертого стержня. При $z = 0$, $y = 0$, $C_1 = 0$. А в точке $z = l$, $v = t_h$ приводят к следующему сокращенному трансцендентному уравнению (26):

$$C_2 \cdot \sin[\beta \cdot \ln(t_h)] = 0. \quad (29)$$

Так как $C_2 \neq 0 \rightarrow \sin[\beta \cdot \ln(t_h)] = 0$ иначе стержень остается прямолинейным и не теряет устойчивость. Устанавливаем, что:

$$\beta \cdot \ln(t_h) = \pi. \quad (30)$$

Подставляя $u = \pi/\mu$ и преобразовывая уравнение (30) относительно коэффициента расчетной длины μ шарнирно опертого центрально-сжатого стержня переменного сечения с изменяющейся жесткостью по длине по параболическому закону при наибольшем поперечном сечении двутавра:

$$\mu = \frac{1}{\frac{(1-t_h)}{\pi} \sqrt{\left[\frac{\pi^2}{\ln^2 t_h} + \frac{1}{4} \right]}}. \quad (31)$$

Формулу (31) следует считать точной. Она позволит не только верифицировать последующие решения, но и произвести оценку точности метода Бубнова – Галеркина.

Ошибка оценивается через соотношение:

$$\gamma_{err} = \frac{P_{cr,b-g}}{P_{cr,t}}, \quad (32)$$

где $P_{cr,b-g}$ — упругая критическая сила, найденная методом Бубнова – Галеркина; $P_{cr,t}$ — упругая кри-

Табл. 1. Ошибка γ_{err} в зависимости от числа слагаемых в ряде синуса

Table 1. The error γ_{err} as a function of the number of terms in the sine series

t_h	Размер матрицы / Matrix size				
	[1 × 1]	[2 × 2]	[3 × 3]	[4 × 4]	[6 × 6]
1	1	1	1	1	1
0,9					
0,8	1,01				
0,7	1,02				
0,6	1,05				
0,5	1,08	1,01			
0,4	1,15	1,02			
0,3	1,25	1,04	1,01		
0,2	1,45	1,11	1,04		
0,1	1,90	1,30	1,14	1,05	

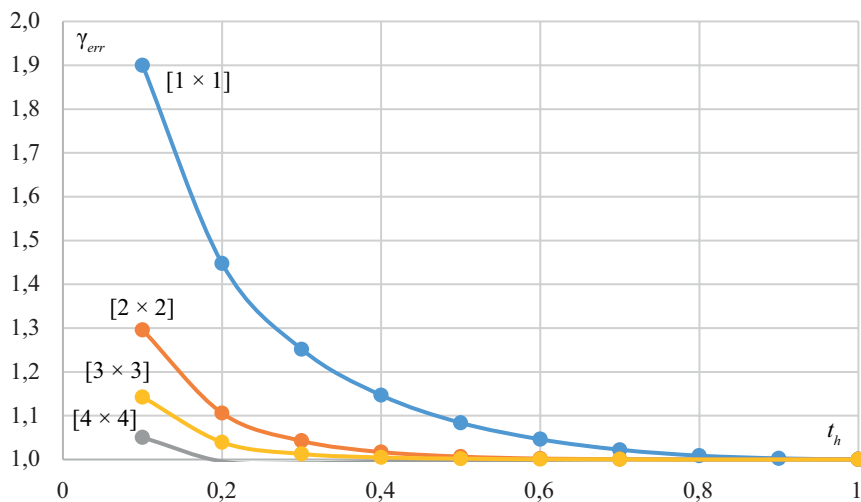


Рис. 2. Ошибка γ_{err} в зависимости от числа слагаемых в ряде синуса
Fig. 2. The error γ_{err} as a function of the number of terms in the sine series

тическая сила, определенная при непосредственном интегрировании дифференциального уравнения. Результаты оценки погрешности сведены в табл. 1 и показаны на рис. 2. По графику видно, что при удержании четырех членов в ряде синуса (16) ошибка отсутствует. Лишь при очень малых значениях $t_h \leq 0,1$ погрешность составляет 5 % от точного решения. Однако такие значения t_h не имеют практической значимости, как и прикладного назначения в стальных конструкциях, и относятся скорее к теоретическим. Из решения (28) можно установить, что коэффициент расчетной длины:

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{a_{11}}}. \tag{33}$$

Поэтому из уравнения (31) следует, что:

$$a_{11} = \frac{(1-t_h)^2}{\pi^2} \left[\frac{\pi^2}{\ln^2 t_h} + \frac{1}{4} \right]. \tag{34}$$

Коэффициент a_{11} по выражению (34) может быть аппроксимирован в форме линейного уравнения:

$$a_{11} = 0,92t_h + 0,08. \tag{35}$$

Это подтверждается, если посмотреть на график зависимости $a_{11} - t_h$, показанный на рис. 3, и на прямую, полученную в результате решения определителя матрицы $[4 \times 4]$. Поэтому заключаем, что коэффициент расчетной длины вместо (31) может быть приведен к более простой, но по-прежнему точной форме:

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{0,92t_h + 0,08}}. \tag{36}$$

В книге М.А. Hirt и М. Crisinel [14] приводится идентичная (36) формула.

Коэффициент расчетной длины μ_z для стержня переменной жесткости варьируется по длине. Упругая критическая сила остается постоянной. Поэтому можно заключить, что коэффициент расчетной длины в любой точке z при $I_{x,z}$:

$$\mu_z = \sqrt{\frac{1}{0,92t_h + 0,08}} \cdot \sqrt{\frac{I_{x,z}}{I_{x,1}}}. \tag{37}$$

Также на длине стержня можно найти некоторое эквивалентное значение момента инерции I_{eq} , при котором $\mu = 1$:

$$P_{cr,t_h} = \frac{\pi^2 EI_{eq}}{l^2 \cdot I^2}, \tag{38}$$

где $I_{eq} = I_{x,1}(0,92t_h + 0,08)$.

Изучим прогиб двутаврового стержня с линейно изменяющейся высотой стенки по длине (26). Так как это бифуркационная задача, будем отталкиваться

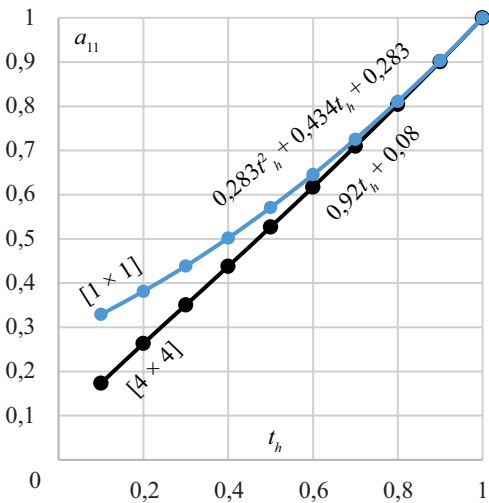


Рис. 3. График зависимости $a_{11} - t_h$
Fig. 3. Relationship between reduction factor t_h and function a_{11}

от уравнения прогиба внецентренно-сжатого стержня. Находим неизвестные коэффициенты C_1 и C_2 . При $z = 0, y = e_{x,1}$ первый неизвестный коэффициент:

$$C_1 = e_{x,1}, \quad (39)$$

где $e_{x,1}$ — эксцентриситет силы при наибольшем поперечном сечении.

Из второй производной при $z = l, v = 1 - bz = t_h$ следует:

$$y'' = -\frac{k^2 y}{v^2} = -\frac{k^2 e_{x,0}}{\left(1 - \frac{1-t_h}{l} l\right)^2} = -\frac{k^2 e_{x,0}}{t_h^2}, \quad (40)$$

где $e_{x,0}$ — эксцентриситет силы при наименьшем поперечном сечении.

Подставляем выражения (39) и (40) в (26) и находим C_2 :

$$C_2 = e_{x,1} \frac{\frac{e_{x,0}}{e_{x,1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{t_h}} - \cos[\beta \cdot \ln(t_h)]}{\sin[\beta \cdot \ln(t_h)]}. \quad (41)$$

Записываем уравнение прогиба (26) с найденными коэффициентами C_1 и C_2 :

$$y(z) = e_{x,1} \left(\sqrt{v} \cdot \cos[\beta \cdot \ln(v)] + \frac{\frac{e_{x,0}}{e_{x,1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{t_h}} - \cos[\beta \cdot \ln(t_h)]}{\sin[\beta \cdot \ln(t_h)]} \times \sqrt{v} \cdot \sin[\beta \cdot \ln(v)] \right). \quad (42)$$

Для шарнирно опертого стержня с соблюдением граничных условий $y(0) = y(l) = 0$ и $e_{x,1} = e_{x,0}$ получим:

$$y(z) = \sqrt{v} \cdot \cos[\beta \cdot \ln(v)] + \frac{\frac{1}{\sqrt{t_h}} - \cos[\beta \cdot \ln(t_h)]}{\sin[\beta \cdot \ln(t_h)]} \sqrt{v} \cdot \sin[\beta \cdot \ln(v)] - 1. \quad (43)$$

Интересует точка z_{cr} по длине стержня, когда прогиб становится максимальным $y(z_{cr}) = y_{\max}$ (см. рис. 4, а). Для стержня постоянной жесткости $z_{cr} = 0,5l$ находится точно на середине длины стержня. Но для стержня переменной жесткости такая точка будет смещаться

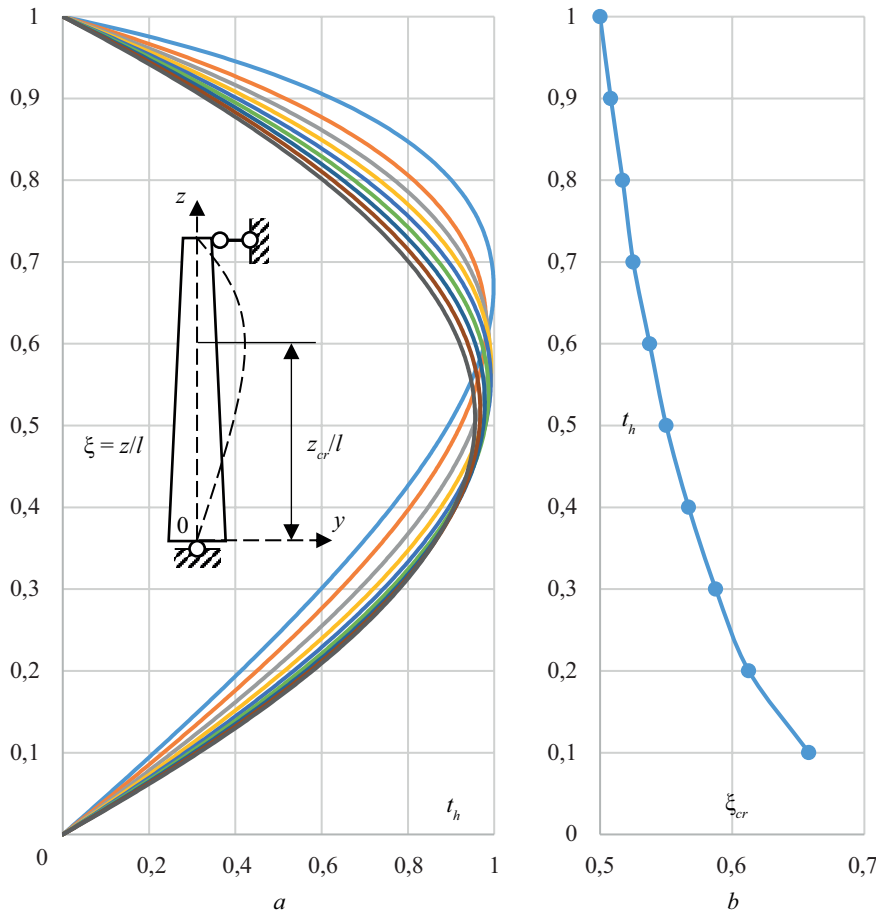


Рис. 4. Нормализованные формы потери устойчивости шарнирно опертой колонны в зависимости от параметра переменности t_h (а); смещение точки ξ_{cr} , вызванное переменностью стержня (б)

Fig. 4. Normalized buckling modes of a pinned column depending on the non-uniformity parameter t_h (а); maximum point displacement caused by member non-uniformity (б)

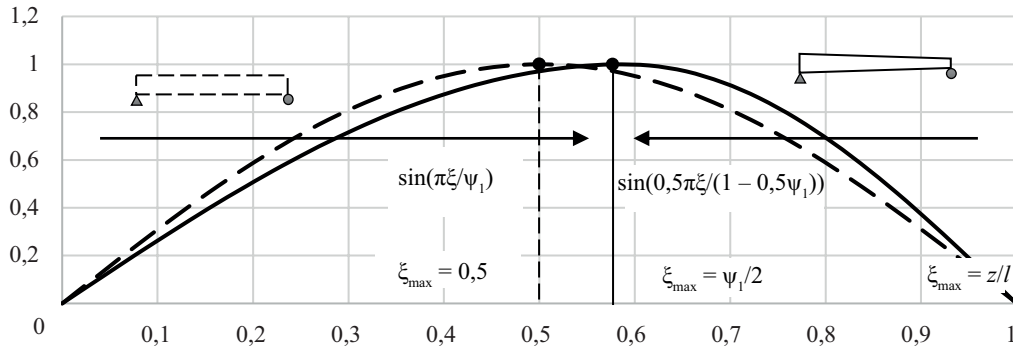


Рис. 5. Нормализованные формы потери устойчивости призматического и конического элемента

Fig. 5. Normalized buckling modes of prismatic and non-prismatic members

в зависимости от t_h . Введем некоторую функцию ψ_1 , которая поможет определить точное положение точки z_{cr} по длине стержня в зависимости от t_h :

$$z_{cr} = 0,5l\psi_1 \rightarrow \xi_{cr} = z_{cr}/l = 0,5\psi_1. \quad (44)$$

Чтобы получить такую точку потребуется построить ряд кривых прогиба. Для этого выбираем характеристики некоторого стержня и подсчитываем упругую критическую силу P_{cr} с коэффициентом расчетной длины по выражению (31) или (36). Сила P_{cr} подставляется в коэффициент переменности β . Таким образом, получаем форму потери устойчивости стержня и нормализуем ее. Кривые в зависимости от t_h показаны на рис. 4, а. Варьируя $0,1 \leq t_h \leq 1$ с шагом 0,1, построим кривую зависимости $\xi_{cr} - t_h$ и покажем на рис. 4, б. Если переменность близка к чрезвычайно малому отношению t_h , так что $I_{x,0}/I_{x,1} \rightarrow 0$ максимальная точка сместится на расстояние $z_{cr} = 0,667l$ от наибольшего момента инерции $I_{x,1}$. Аппроксимируя кривую из рис. 4, б, получим следующее уравнение для параметра ψ_1 в выражении (44):

$$\psi_1 = 1 + 0,35(1 - t_h)^2, \quad (45)$$

где $\psi_1 \geq 1$.

Уравнение (45) дает возможность изменить функцию синуса (16) и представить базисную функцию с введением параметра асимметричности ψ_1 . Функцию возможно преобразовать к следующему виду:

$$\int_0^1 \sin(\pi\xi) d\xi = \int_0^{\frac{\psi_1}{2}} \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\xi}{\frac{\psi_1}{2}}\right) d\xi + \int_{\frac{\psi_1}{2}}^1 \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{1-\xi}{1-\frac{\psi_1}{2}}\right) d\xi. \quad (46)$$

На рис. 5 для наглядности продемонстрировано, как переменность оказывает влияние на форму потери устойчивости стержня. Точка максимума смещается в сторону поперечного сечения с наименьшей жесткостью. А форма потери устойчивости

конического стержня становится асимметричной относительно середины длины. Поэтому будет удобным представить такую форму потери устойчивости в виде суммы из двух слагаемых.

Найдем вновь коэффициент канонического уравнения (12) c_{11} , но уже с подстановкой в выражение (46). Интегральное выражение при осевой сжимающей силе изменять не нужно, потому как любой член интегрального уравнения, не содержащий бинорма, будет иметь табличное решение даже с измененной функцией синуса:

$$c_{11} = \frac{\pi^4}{l^4} EI_{x,1} \left(\int_0^{0,5\psi_1} (1 - (1 - t_h)\xi)^2 \sin^2\left(\frac{\pi\xi}{\psi_1}\right) d\xi + \int_{0,5\psi_1}^{1-0,5\psi_1} (t_h + (1 - t_h)\xi)^2 \times \sin^2\left(\frac{0,5\pi\xi}{1-0,5\psi_1}\right) d\xi \right) - P \frac{\pi^2}{l^2} \frac{l}{2}. \quad (47)$$

Интегрируя, получим алгебраическое уравнение:

$$c_{11} = \frac{l}{2} \frac{\pi^2}{l^2} \left(\frac{\pi^2}{l^2} EI_{x,1} a_{11}^* - P \right) = 0, \quad (48)$$

в котором диакритическим знаком обозначен видоизменившийся коэффициент редукции жесткости стержня:

$$a_{11}^* = \psi_1 \left[\left(\frac{0,131}{\psi_1} + 0,152 \right) t_h^2 + \left(\frac{0,333}{\psi_1} + 0,101 \right) t_h + \left(\frac{0,536}{\psi_1} - 0,253 \right) \right]. \quad (49)$$

Если $\psi_1 = 1$, то выражение (49) вернется к виду a_{11} из уравнения (27). На рис. 6 нанесены кривая по (49), коэффициент редукции a_{11} при удержании только первого слагаемого в ряде синуса и точная зависимость по (35). Можно наблюдать, что коэффициент редукции (49)

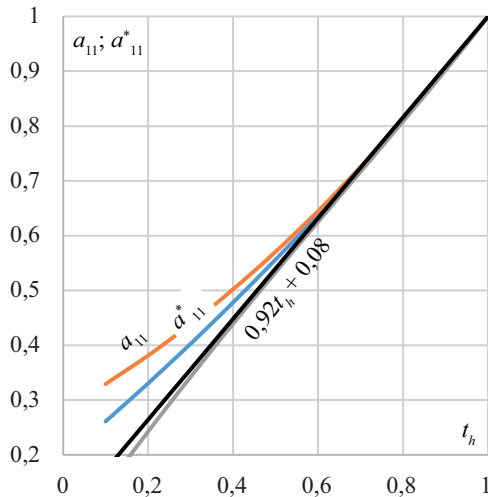


Рис. 6. График зависимости $a_{11} - t_h$

Fig. 6. Relationship between reduction factor t_h and function a_{11}

оказывается значительно ближе к (35), что также означает лучшую сходимость ряда при включении параметра асимметричности ψ_1 . Серым цветом показан коэффициент редукции a_{11}^* при удержании большего числа слагаемых в ряду синуса по (46), который может быть аппроксимирован как:

$$a_{11}^* = \psi_1 \left[0,283t_h^2 + 0,434t_h + \left(\frac{1}{\psi_1} - 0,717 \right) \right]. \quad (50)$$

Как видно, выражение (50) полностью повторяет точную зависимость из метода непосредственного интегрирования дифференциального уравнения. Из этого следует, что коэффициент расчетной длины может быть представлен в новой форме:

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{\psi_1 \left(0,283t_h^2 + 0,434t_h + \left(\frac{1}{\psi_1} - 0,717 \right) \right)}}. \quad (51)$$

Сравнительный анализ коэффициента расчетной длины

Вначале сравним значения коэффициента расчетной длины по методу Бубнова – Галеркина. Проследим, как число удерживаемых слагаемых ряда синуса влияет на быстроту сходимости. Результаты занесены в сводную табл. 2. С небольшой погрешностью будет достаточным решать матрицу $[3 \times 3]$. А если взять за основу практические результаты проектирования рам и, в частности, проанализировать некоторые из работ по оптимизации рам переменной жесткости, например Н. Aisamp [24] и Р. Hradil [25], станет ясно, что переменность t_h скорее будет тяготеть к границе $t_h \geq 0,5$ и ниже этого значения может не иметь практического применения, что означает пригодность решения $[1 \times 1]$.

Далее занесем в табл. 3 значения коэффициента расчетной длины, полученные с помощью графоаналитического метода П.И. Алексеева [11]. Результаты

оказываются вновь близкими к точным значениям, что делает такой метод полезным в силу своей возможности учитывать наличие отверстий и перфораций в стенке двутавра.

И последним выполним сравнительный анализ с формулой, предложенной G.C. Lee [15]. Формула была получена путем аппроксимации кривой результата опытов над серией стержней с пятью разными поперечными сечениями:

$$\mu_0 = 1 - 0,375\gamma_0 + 0,08\gamma_0^2(1 - 0,0775\gamma_0), \quad (52)$$

где $\gamma_0 = (h_1/h_0) - 1$, $\gamma \leq 0,268 \cdot (l/h_0) \leq 6$.

Коэффициент расчетной длины (52) определен при наименьшем поперечном сечении. Для перевода μ_0 к μ^1 при наибольшем поперечном сечении воспользуемся формулой:

$$\mu_1 = \mu_0/t_h. \quad (53)$$

На примере колонны высотой 60 см получена сводная табл. 4 результатов. И вновь значения оказываются близкими к друг другу и имеют лишь некоторое расхождение при очень низких значениях t_h . В работах [26–28] также проведен параметрический анализ коэффициента расчетной длины, в том числе и по формуле (52), подтверждающий полученные здесь значения.

Критическая точка z_{cr}

В документе Design Guide 25 [29] упругую критическую силу P_{cr} шарнирно опертого двутаврового стержня с переменной высотой стенки колонны предлагается вычислять при моменте инерции с $\mu = 1$, используя эмпирическую формулу z_{cr} , полученную с помощью МКЭ:

$$z_{cr} = 0,5l \cdot t_h^{0,1464}. \quad (54)$$

В работе [30] по результатам численного анализа и в статье [31] энергетическим способом были получены некоторые другие зависимости. Одна из них

Табл. 2. Коэффициент расчетной длины μ

Table 2. Effective length factor μ

t_h	(51)	Размер матрицы / Matrix size				(31)
		[1 × 1]	[2 × 2]	[3 × 3]	[4 × 4]	
1	1					
0,9	1,053	1,052	1,054	1,054	1,054	1,054
0,8	1,112	1,110	1,115	1,115	1,115	1,115
0,7	1,181	1,174	1,187	1,187	1,187	1,187
0,6	1,264	1,245	1,272	1,273	1,274	1,273
0,5	1,369	1,324	1,374	1,377	1,380	1,378
0,4	1,509	1,412	1,499	1,508	1,515	1,511
0,3	1,709	1,510	1,655	1,679	1,697	1,689
0,2	2,031	1,620	1,853	1,912	1,954	1,949
0,1	2,682	1,743	2,110	2,248	2,344	2,402

Табл. 3. Коэффициент расчетной длины μ

Table 3. Effective length factor μ

$t_h^2 = I_{x,0}/I_{x,1}$	$t_h = \sqrt{I_{x,0}/I_{x,1}}$	μ		
		(51)	(36)	П.И. Алексеев / P.I. Alekseyev [11]
0,1	0,316	1,671	1,642	1,778
0,2	0,447	1,438	1,426	1,495
0,3	0,548	1,316	1,309	1,351
0,5	0,707	1,176	1,170	1,189
0,7	0,837	1,089	1,085	1,093
0,9	0,949	1,026	1,024	1,027
1	1	1		

Табл. 4. Коэффициент расчетной длины μ

Table 4. Effective length factor μ

γ_0	$h_1, \text{ cm} / \text{ cm}$	$h_0, \text{ cm} / \text{ cm}$	$I_{x,0}, \text{ cm}^4 / \text{ cm}^4$	$I_{x,1}, \text{ cm}^4 / \text{ cm}^4$	t_h	μ	
						(36)	G.C. Lee [15]
0,00	60	60	118 331	118 331	1		
0,09		55	97 525		0,908	1,045	1,065
0,20		50	78 969		0,817	1,097	1,136
0,33		45	62 583		0,727	1,156	1,215
0,50		40	48 292		0,639	1,224	1,302
1,00		30	25 682		0,466	1,402	1,500
1,40		25	17 209		0,381	1,524	1,612
2,00		20	10 520		0,298	1,680	1,745
3,00		15	5540		0,216	1,894	1,976
5,00		10	2190		0,136	2,208	2,573

Табл. 5. Максимальное смещение точки ξ_{cr} , вызванное переменностью стержня

Table 5. Maximum displacement of point ξ_{cr} caused by rod non-uniformity

$\gamma_1 = h_1/h_0$	$t_h = \sqrt{I_{x,0}/I_{x,1}}$	$\xi_{cr} = \frac{z_{cr}}{l}$		
		(44)	(54)	(55)
1	1	0,5		
1,09	0,908	0,499	0,493	0,491
1,33	0,727	0,487	0,477	0,471
2,00	0,466	0,450	0,447	0,433
2,40	0,381	0,433	0,434	0,417
4,00	0,216	0,392	0,400	0,375
6,00	0,136	0,369	0,373	0,344
12,00	0,058	0,345	0,329	0,298

приведена в схожей формулировке через отношение высоты колонны:

$$z_{cr} = 0,5l \left(\frac{h_1}{h_0} \right)^{-0,21}. \quad (55)$$

В табл. 5 занесены значения по выражениям (54) и (55), которые сравниваются с формулой (44) и параметром ψ_1 (45) на примере колонны высотой 60 см, взятой из предыдущей табл. 4. В формулах (54) и (55) расстояние отсчитывается от наименьшего поперечного сечения. В текущем исследовании, напомним, ноль принят при наибольшем поперечном сечении. Поэтому значения в табл. 5 для выражения (44) приведены как $1 - \xi_{cr}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показанный способ определения коэффициента расчетной длины μ колонны переменной жесткости с введением в него параметра асимметричности ψ_1 указывает на возможность распространения текущего подхода на задачу плоской формы потери устойчивости балки и изгибно-крутильной потери устойчивости внецентренно-сжатой колонны переменной жесткости. Используя аналитический метод Бубнова – Галеркина, возможно получить эквивалентные величины геометрических характеристик конического стержня с помощью коэффициентов редукции. По результатам проведенного исследования для вычисления коэффициента расчетной длины может быть рекомендована любая из формул: (31), (36) или (51).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Динник А.Н. Устойчивость упругих систем. М. ; Л. : ОНТИ НКТП СССР, 1935. 183 с.
2. Ржаницын А.Р. Устойчивость равновесия упругих систем. М. : Гостехиздат, 1955. 475 с.
3. Блейх Ф. Устойчивость металлических конструкций. М. : Физматгиз, 1959. 544 с.
4. Смирнов А.Ф. Устойчивость и колебания сооружений. М. : Трансжелдориздат, 1958. 571 с.
5. Gatewood B.E. Buckling loads for columns of variable cross section // Journal of the Aeronautical Sciences. 1954. Vol. 21. Issue 4. Pp. 287–288. DOI: 10.2514/8.3001
6. Branch T.A. Buckling loads for tapered slender elastic columns : thesis. Montana State University, 1967. 96 p.
7. Казан-Розенцвейг Л.М., Халецкая О.Б. Простая приближенная формула для критической силы в упругом стержне переменного сечения // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 1 (66). С. 50–52. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-1-50-52. EDN URZTYO.
8. Киселев В.А. Строительная механика. Специальный курс. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1980. 616 с.
9. Снитко Н.К. Устойчивость стержней переменного сечения // Строительная механика и расчет сооружений. 1968. № 1. С. 34–35.
10. Сеницкий Ю.Э., Ишутин А.С. Общая устойчивость сжатых составных стержней переменного сечения // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2015. Т. 19. № 2. С. 341–357. DOI: 10.14498/vsgtu1350. EDN UGXOBF.
11. Алексеев П.И. Устойчивость стержней и балок. К. : Будивельник, 1964. 126 с.
12. Salvadori M.G. Numerical computation of buckling loads by finite differences // Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1951. Vol. 116. Issue 1. Pp. 590–624. DOI: 10.1061/taceat.0006570
13. Eisenberger M., Cohen R. Flexural-Torsional Buckling of Variable and Open Cross-Section Members // Journal of Engineering Mechanics. 1995. Vol. 121. Issue 2. Pp. 244–254. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(1995)121:2(244)
14. Hirt M.A., Crisinel M. Charpentes métalliques: Conception et dimensionnement des halles et bâtiments, traité de génie civil. Press polytechniques et universitaires romandes, 2001. Vol. 11. 714 p.
15. Lee G.C., Morrell M.L., Ketter R.L. Design of tapered members // Welding Research Council Bulletin. 1972. Vol. 173. Pp. 1–32.
16. Baptista A.M., Muzeau J.P. Design of tapered compression members according to Eurocode 3 // Journal of Constructional Steel Research. 1998. Vol. 46. Issue 1–3. Pp. 146–148. DOI: 10.1016/S0143-974X(98)00064-9
17. Sapalas V., Samofalov M., Saraskinas V. Fem stability analysis of tapered beam-columns // Journal of Civil Engineering and Management. 2005. Vol. 11. Issue 3. Pp. 211–216. DOI: 10.1080/13923730.2005.9636352
18. Smith W.G. Analytic solutions for tapered column buckling // Computers & Structures. 1988. Vol. 28. Issue 5. Pp. 677–681. DOI: 10.1016/0045-7949(88)-90011-9
19. Ermopoulos J.C. Buckling of tapered bars under stepped axial loads // Journal of Structural Engineering. 1986. Vol. 112. Issue 6. Pp. 1346–1354. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1986)112:6(1346)
20. Ermopoulos J.C. Equivalent buckling length of non-uniform members // Journal of Constructional Steel Research. 1997. Vol. 42. Issue 2. Pp. 141–158. DOI: 10.1016/s0143-974x(97)00010-2
21. Belyy G., Askinazi V. Overall stability of steel web-tapered members // Materials Physics and Mechanics. 2017. Vol. 31. Issue 1/2. Pp. 63–66.
22. Cywinski Z. Statyka I Dynamika Skrecanego Cienkosciennego Dwuteownika o Zmiennym, Bisyme-

trycznym Przekroju Poprzecznym // Engineering Transactions. 1969. Vol. 17. Issue 2. Pp. 185–217.

23. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. М. : Физматгиз, 1959. 574 с.

24. Aucamp H. The optimization of web-tapered portal frame buildings: master thesis. University of Stellenbosch, South Africa, 2017. 180 p.

25. Hradil P., Mielonen M., Fulop L. Optimization tools for steel portal frames — Effective modelling of lateral supports // VTT Technical Research Centre of Finland. 2010. 33 p.

26. Ibrahim Sh.M. Effective buckling length of frames with tapered columns and partially tapered beams // Journal of Constructional Steel Research. 2021. Vol. 187. P. 106993. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106993. EDN SXGMQI.

27. Doksanovic T., Radic I., Bisercic B. Buckling resistance of tapered steel columns // Applied Sciences.

2023. Vol. 13. Issue 20. P. 11498. DOI: 10.3390/app132011498. EDN ACBTHY.

28. Tankova T., Martins J.P., da Silva L.S., Simoes R., Craveiro H.D. Experimental buckling behaviour of web tapered I-section steel columns // Journal of Constructional Steel Research. 2018. Vol. 147. Pp. 293–312. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.04.015

29. White D.W., Woo Y.K., Slein R. Frame Design Using Nonprismatic Members. 2nd Ed. Design Guide 25. Chicago, AISC, 2021. 406 p.

30. Marques L.R.S. Tapered steel members flexural and lateral-torsional buckling : PhD dissertation. University of Coimbra, Portugal, 2012. 271 p.

31. Marques L.R.S., Da Silva L.S., Rebelo C. Rayleigh-Ritz procedure for determination of the critical load of tapered columns // Steel and Composite Structures. 2014. Vol. 16. Issue 1. Pp. 45–58. DOI: 10.12989/scs.2014.16.1.045

Поступила в редакцию 24 ноября 2025 г.

Принята в доработанном виде 17 января 2026 г.

Одобрена для публикации 18 января 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: Александр Олегович Ильюшенко — инженер промышленного и гражданского строительства, ведущий инженер архитектурно-строительного отдела; Территориальный проектный институт «Хабаровскпромпроект» (ТПИ «Хабаровскпромпроект»); 680000, г. Хабаровск, Уссурийский бульвар, д. 2; revivaltree@gmail.com.

REFERENCES

1. Dinnik A.N. *Stability of elastic systems*. Moscow; Leningrad, USTP PCHI USSR, 1935; 183. (rus.).

2. Rzhantsyn A.R. *Stability of equilibrium of elastic systems*. Moscow, Gostekhizdat, 1955; 475. (rus.).

3. Bleich F. *Stability of steel constructions*. Moscow, Fizmatgiz, 1959; 544. (rus.).

4. Smirnov A.F. *Stability and vibrations of structures*. Moscow, Transzheldorizdat, 1958; 571. (rus.).

5. Gatewood B.E. Buckling loads for columns of variable cross section. *Journal of the Aeronautical Sciences*. 1954; 21(4):287-288. DOI: 10.2514/8.3001

6. Branch T.A. *Buckling loads for tapered slender elastic columns : thesis*. Montana State University, 1967; 96.

7. Kagan-Rosenzweig L.M., Khaletska O.B. Simple approximate formula for critical force in elastic rod with variable cross-section. *Bulletin of Civil Engineers*. 2018; 1(66):50-52. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-1-50-52. EDN URZTYO. (rus.).

8. Kiselev V.A. *Structural Mechanics. Special Course. 3rd ed., revised and expanded*. Moscow, Stroiizdat, 1980; 616. (rus.).

9. Snitko N.K. Stability of rods of variable cross-section. *Structural Mechanics and Structural Analysis*. 1968; 1:34-35. (rus.).

10. Senitsky Yu.E., Ishutin A.S. Overall stability of compressed compound bars in variable cross section.

Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences. 2015; 19(2):341-357. DOI: 10.14498/vsgtu1350. EDN UGXOBF. (rus.).

11. Alekseev P.I. *Stability of rods and beams*. Kiev, Budivelnik, 1964; 126. (rus.).

12. Salvadori M.G. Numerical computation of buckling loads by finite differences. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 1951; 116(1):590-624. DOI: 10.1061/taceat.0006570

13. Eisenberger M., Cohen R. Flexural-Torsional Buckling of Variable and Open Cross-Section Members. *Journal of Engineering Mechanics*. 1995; 121(2):244-254. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(1995)121:2(244)

14. Hirt M.A., Crisinel M. *Charpentiers métalliques: Conception et dimensionnement des halles et bâtiments, traité de génie civil*. Press polytechniques et universitaires romandes, 2001; 11:714.

15. Lee G.C., Morrell M.L., Ketter R.L. Design of tapered members. *Welding Research Council Bulletin*. 1972; 173:1-32.

16. Baptista A.M., Muzeau J.P. Design of tapered compression members according to Eurocode 3. *Journal of Constructional Steel Research*. 1998; 46(1-3):146-148. DOI: 10.1016/S0143-974X(98)00064-9

17. Sapalas V., Samofalov M., Saraskinas V. Fem stability analysis of tapered beam-columns. *Journal of Civil*

Engineering and Management. 2005; 11(3):211-216. DOI: 10.1080/13923730.2005.9636352

18. Smith W.G. Analytic solutions for tapered column buckling. *Computers & Structures*. 1988; 28(5):677-681. DOI: 10.1016/0045-7949(88)90011-9

19. Ermopoulos J.C. Buckling of tapered bars under stepped axial loads. *Journal of Structural Engineering*. 1986; 112(6):1346-1354. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1986)112:6(1346)

20. Ermopoulos J.C. Equivalent buckling length of non-uniform members. *Journal of Constructional Steel Research*. 1997; 42(2):141-158. DOI: 10.1016/s0143-974x(97)00010-2

21. Belyy G., Askinazi V. Overall stability of steel web-tapered members. *Materials Physics and Mechanics*. 2017; 31(1/2):63-66.

22. Cywinski Z. Statyka i Dynamika Skrecanego Cienkosciennego Dwuteownika o Zmiennym, Bisymetrycznym Przekroju Poprzecznym. *Engineering Transactions*. 1969; 17(2):185-217.

23. Vlasov V.Z. *Thin-walled elastic rods*. Moscow, Fizmatgiz, 1959; 574. (rus.).

24. Aucamp H. *The optimization of web-tapered portal frame buildings : master thesis*. University of Stellenbosch, South Africa, 2017; 180.

25. Hradil P., Mielonen M., Fulop L. Optimization tools for steel portal frames — Effective modelling of lateral

supports. *VTT Technical Research Centre of Finland*. 2010; 33.

26. Ibrahim Sh.M. Effective buckling length of frames with tapered columns and partially tapered beams. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021; 187:106993. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106993. EDN SXGMQI.

27. Doksanovic T., Radic I., Bisercic B. Buckling resistance of tapered steel columns. *Applied Sciences*. 2023; 13(20):11498. DOI: 10.3390/app132011498. EDN ACBTHY.

28. Tankova T., Martins J.P., da Silva L.S., Simoes R., Craveiro H.D. Experimental buckling behaviour of web tapered I-section steel columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018; 147:293-312. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.04.015

29. White D.W., Woo Y.K., Slein R. Frame Design Using Nonprismatic Members. *2st Ed. Design Guide 25*. Chicago, AISC, 2021; 406.

30. Marques L.R.S. *Tapered steel members flexural and lateral-torsional buckling : PhD dissertation*. University of Coimbra, Portugal, 2012; 271.

31. Marques L.R.S., Da Silva L.S., Rebelo C. Rayleigh-Ritz procedure for determination of the critical load of tapered columns. *Steel and Composite Structures*. 2014; 16(1):45-58. DOI: 10.12989/scs.2014.16.1.045

Received November 24, 2025.

Adopted in revised form on January 17, 2026.

Approved for publication on January 18, 2026.

B I O N O T E S : **Alexander O. Ilyushenkov** — industrial and civil construction engineer, leading engineer of the Architectural and Construction Department; **Territorial Design Institute “Khabarovskpromproekt”**; 2 Ussuriysky boulevard, Khabarovsk, 680000, Russian Federation; revivaltree@gmail.com.

Гармонический осциллятор Дуффинга. Эволюция аттрактора

Юлия Владимировна Азарова, Даниил Николаевич Казаков,
Владимир Андреевич Бунин, Сергей Владимирович Кузнецов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрена задача анализа нелинейных колебаний гармонического осциллятора Дуффинга, актуальная для оценки устойчивости механических и строительных систем с упругими и демпфирующими элементами. Актуальность исследования обусловлена необходимостью описания переходов от регулярных колебаний к хаосу в элементах сейсмоизоляции и виброзащиты зданий. Новизна работы заключается в применении метода Розенштейна для количественной оценки экспонентоподобной величины e_1 вместо традиционного визуального анализа, использованного в классических исследованиях Ю. Уэды (1979).

Материалы и методы. Математическая модель осциллятора описывается уравнением $\ddot{x} + k\dot{x} + x^3 = B\cos(\omega t)$. Численное решение получено в среде MATLAB с применением пакета «+ueda». Для анализа динамики построены сечения Пуанкаре и рассчитаны экспонентоподобные величины e_1 методом Розенштейна, основанном на отслеживании расхождения траекторий в реконструированном фазовом пространстве.

Результаты. Показано, что при увеличении амплитуды возбуждения B (при $k = 0,10$) система переходит от периодических режимов к хаотическим через квазипериодичность. При увеличении демпфирования k (при $B = 12,0$) наблюдается обратный процесс — постепенное подавление хаоса и возвращение к регулярным колебаниям. Построены зависимости $e_1(B)$ и $e_1(k)$, уточняющие границы переходов к хаосу по сравнению с данными Ю. Уэды. Метод Розенштейна позволил количественно подтвердить наличие критических интервалов $B_c = 11,9-12,2$ и $k_c = 0,26-0,30$.

Выводы. Результаты исследования подтвердили применимость метода Розенштейна для количественной идентификации хаотических режимов в системах Дуффинга. Полученные данные уточняют границы переходов, согласуясь с классическими работами, и могут быть использованы при проектировании сейсмоизоляторов и вибродемпфирующих устройств, где необходимо избегать хаотических колебаний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: осциллятор Дуффинга, метод Розенштейна, аттрактор, хаос, сечение Пуанкаре, сейсмоизоляция, демпфирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Азарова Ю.В., Казаков Д.Н., Бунин В.А., Кузнецов С.В. Гармонический осциллятор Дуффинга. Эволюция аттрактора // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 6. С. 898–905. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.898-905

Авторы, ответственные за переписку: Сергей Владимирович Кузнецов, KuznetsovSV@mgsu.ru; Юлия Владимировна Азарова, AzarovaYV@yandex.ru.

Duffing harmonic oscillator. Evolution of the attractor

Yulia V. Azarova, Daniil N. Kazakov, Vladimir A. Bunin, Sergey V. Kuznetsov

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

ABSTRACT

Introduction. The paper investigates nonlinear oscillations of the Duffing harmonic oscillator, which are relevant for assessing the stability of mechanical and structural systems with elastic and damping components. The study's relevance is linked to understanding the transition from regular to chaotic oscillations in seismic isolation and vibration control elements. The novelty lies in applying the Rosenstein method to quantitatively estimate the exponent-like quantity e_1 , replacing the qualitative approach used in Ueda's classical studies (1979).

Materials and methods. The oscillator is described by the equation $\ddot{x} + k\dot{x} + x^3 = B\cos(\omega t)$. Numerical integration was performed in MATLAB using the custom “+ueda” package. The dynamics were analyzed through Poincaré sections and by calculating the exponent-like value e_1 using the Rosenstein algorithm, which tracks divergence of nearby trajectories in the reconstructed phase space.

Results. It is shown that increasing the excitation amplitude B (at $k = 0.10$) drives the system from periodic to chaotic motion via quasi-periodic states. Increasing the damping k (at $B = 12.0$) suppresses chaotic oscillations, restoring regular behaviour. The dependencies $e_1(B)$ and $e_1(k)$ refine the boundaries of chaos onset compared to Ueda's results, identifying critical intervals $B_c = 11.9-12.2$ and $k_c = 0.26-0.30$.

Conclusions. The results of the study confirmed the applicability of the Rosenstein method for the quantitative identification of chaotic modes in Duffing systems. The data obtained refine the boundaries of the transitions, in line with classical studies, and can be used in the design of seismic isolators and vibration-damping devices where it is necessary to avoid chaotic oscillations.

KEYWORDS: Duffing oscillator, Rosenstein method, attractor, chaos, Poincaré section, seismic isolation, damping

FOR CITATION: Azarova Yu.V., Kazakov D.N., Bunin V.A., Kuznetsov S.V. Duffing harmonic oscillator. Evolution of the attractor. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(6):898-905. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.898-905 (rus.).

Corresponding authors: Sergey V. Kusnetsov, KuznetsovSV@mgsu.ru; Yulia V. Azarova, Azarovauv@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

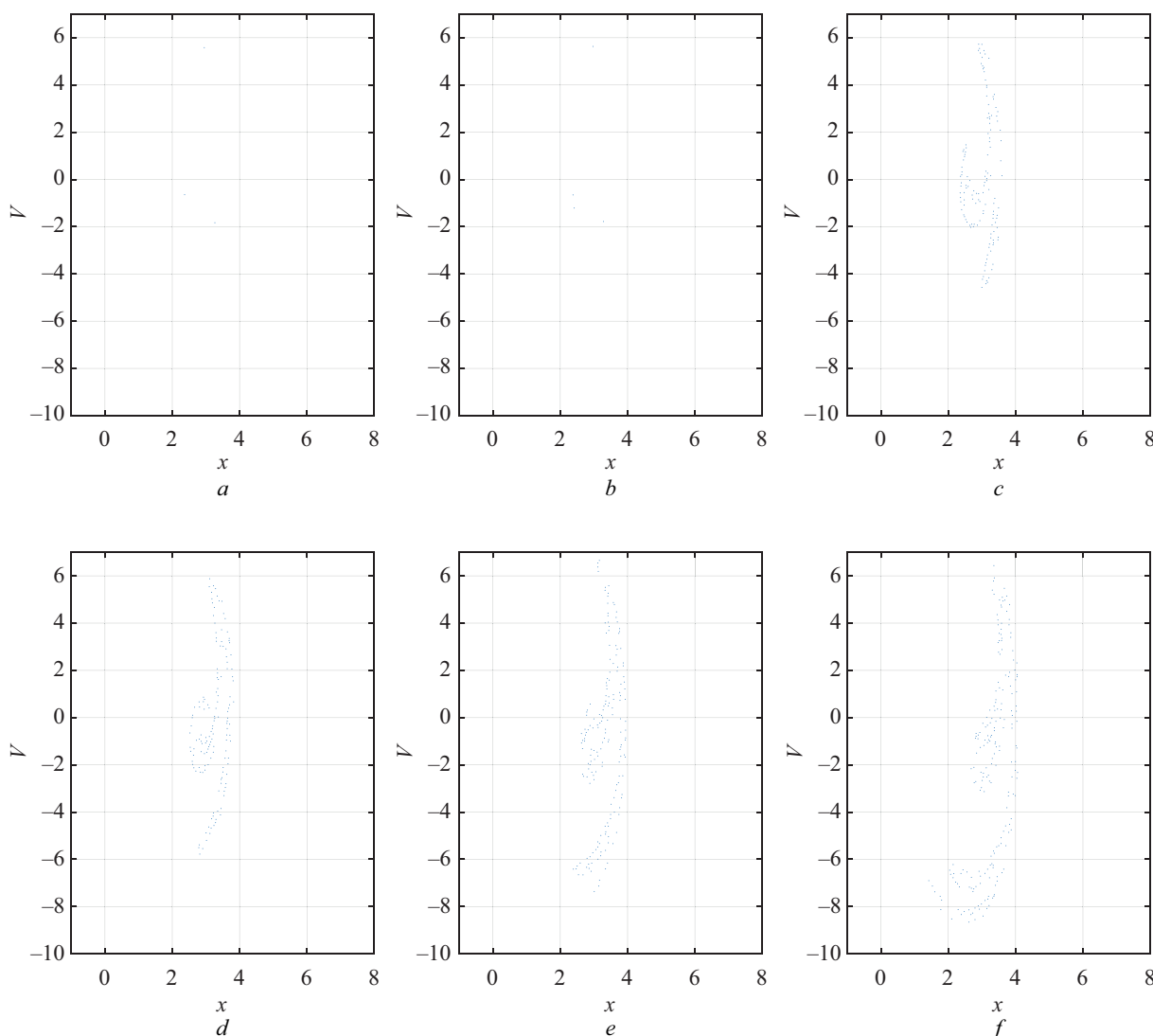
Исследование нелинейных колебаний остается одной из центральных проблем прикладной динамики и строительной механики [1–5]. Сложные режимы движения от периодических до хаотических проявляются в системах с упругими и диссипативными элементами, включая сейсмоизоляторы, вибрационные опоры и демпферы [6–8].

Одной из базовых моделей, описывающих нелинейную упругость и переходы к хаосу, является осциллятор Дуффинга [9–13]. Он демонстрирует широкий спектр режимов, включая бифуркации, квазипериодичность и хаос, в зависимости от амплитуды возбуждения и коэффициента демпфирования.

Классические работы Ю. Уэды [14] впервые показали, что при увеличении амплитуды внешнего гармонического воздействия система переходит от устойчивых колебаний к хаотическим. Однако в его исследованиях использовались методики фазового анализа и визуального выделения аттракторов без количественной оценки скорости расхождения траекторий.

Современные подходы к анализу хаоса основаны на вычислении локальных показателей Ляпунова (или их аппроксимаций), позволяющих количественно отличать регулярные и хаотические движения [15, 16].

Цель настоящей работы — провести уточненное численное исследование эволюции аттрактора осциллятора Дуффинга при изменении параметров



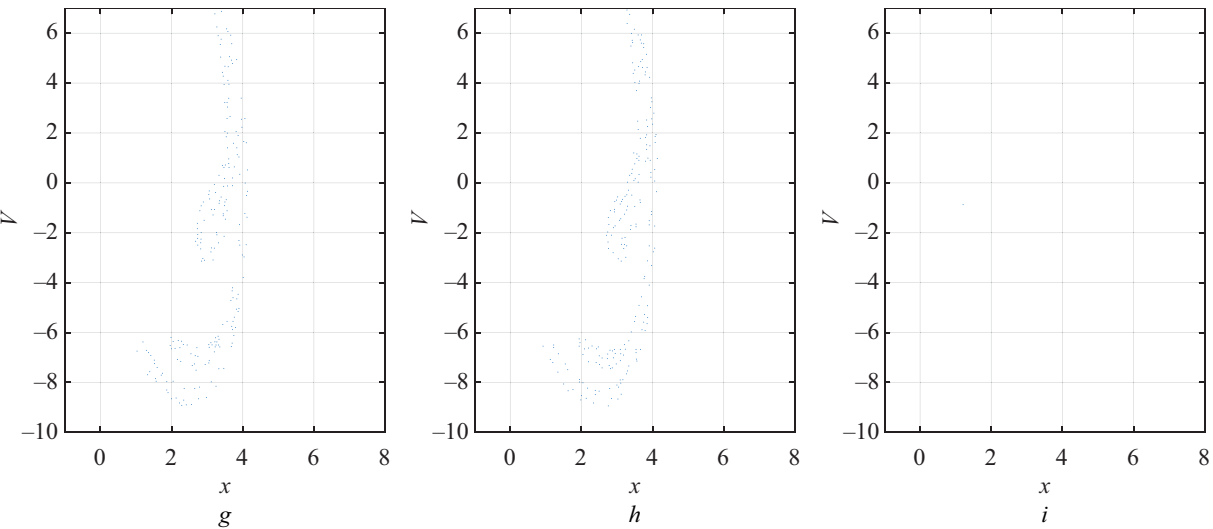


Рис. 1. Эволюция сечения Пуанкаре при росте амплитуды B (фиксированный $k = 0,10$): $a — B = 9,80$; $b — B = 9,90$; $c — B = 10,00$; $d — B = 11,00$; $e — B = 12,00$; $f — B = 13,00$; $g — B = 13,20$; $h — B = 13,30$; $i — B = 13,40$

Fig. 1. Evolution of Poincaré section with increasing size of B (fixed $k = 0.10$): $a — B = 9.80$; $b — B = 9.90$; $c — B = 10.00$; $d — B = 11.00$; $e — B = 12.00$; $f — B = 13.00$; $g — B = 13.20$; $h — B = 13.30$; $i — B = 13.40$

возбуждения с применением метода Розенштейна [17] для расчета экспонентоподобной величины e_1 , отражающей локальную степень хаотичности системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Математическая модель

Рассматривается безразмерное уравнение осциллятора Дуффинга:

$$\ddot{x} + k\dot{x} + x^3 = B\cos(\omega t), \tag{1}$$

где x — координата смещения; k — коэффициент демпфирования; B — амплитуда внешнего возбуждения; $\omega = 1$ — частота возбуждения.

Интегрирование выполнялось по схеме Рунге – Кутты 4-го порядка при $\Delta t = 0,01$ и общей длительности $T = 6000$. После переходного участка (≈ 2000 ед.)

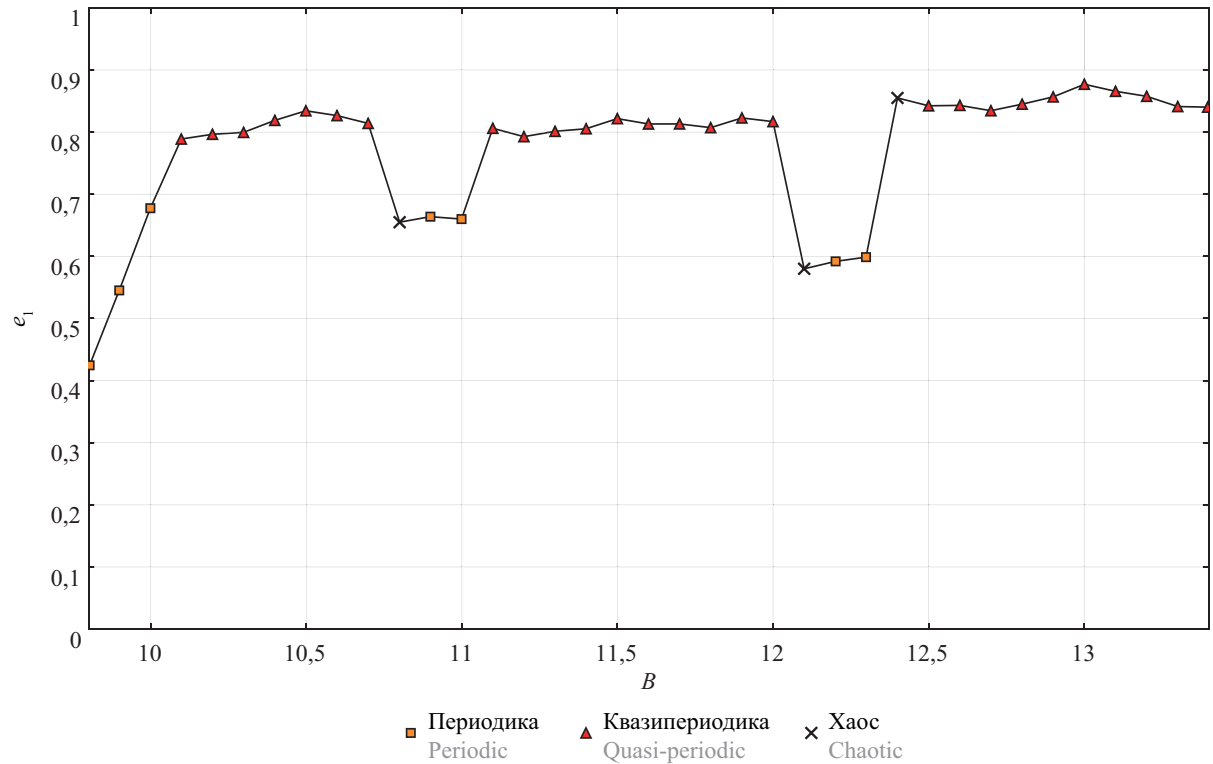


Рис. 2. Зависимость $e_1(B)$ при фиксированном $k = 0,10$

Fig. 2. Dependence $e_1(B)$ with a fixed $k = 0.10$

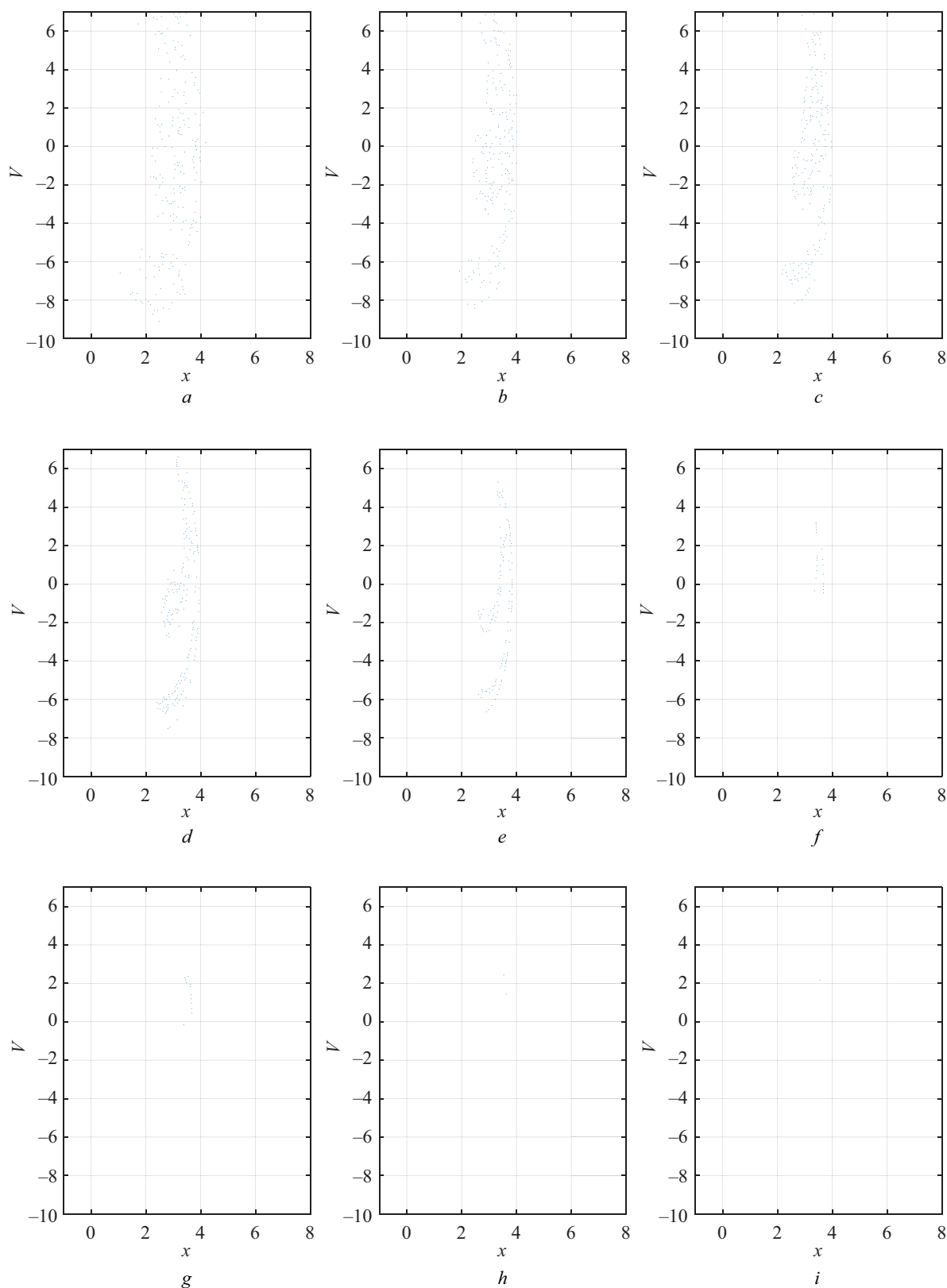


Рис. 3. Эволюция аттрактора при росте k (фиксированная $B = 12,0$): $a — k = 0,01$; $b — k = 0,03$; $c — k = 0,05$; $d — k = 0,10$; $e — k = 0,20$; $f — k = 0,30$; $g — k = 0,31$; $h — k = 0,32$; $i — k = 0,34$

Fig. 3. Evolution of attractor with increasing size k (fixed $B = 12.0$): $a — k = 0.01$; $b — k = 0.03$; $c — k = 0.05$; $d — k = 0.10$; $e — k = 0.20$; $f — k = 0.30$; $g — k = 0.31$; $h — k = 0.32$; $i — k = 0.34$

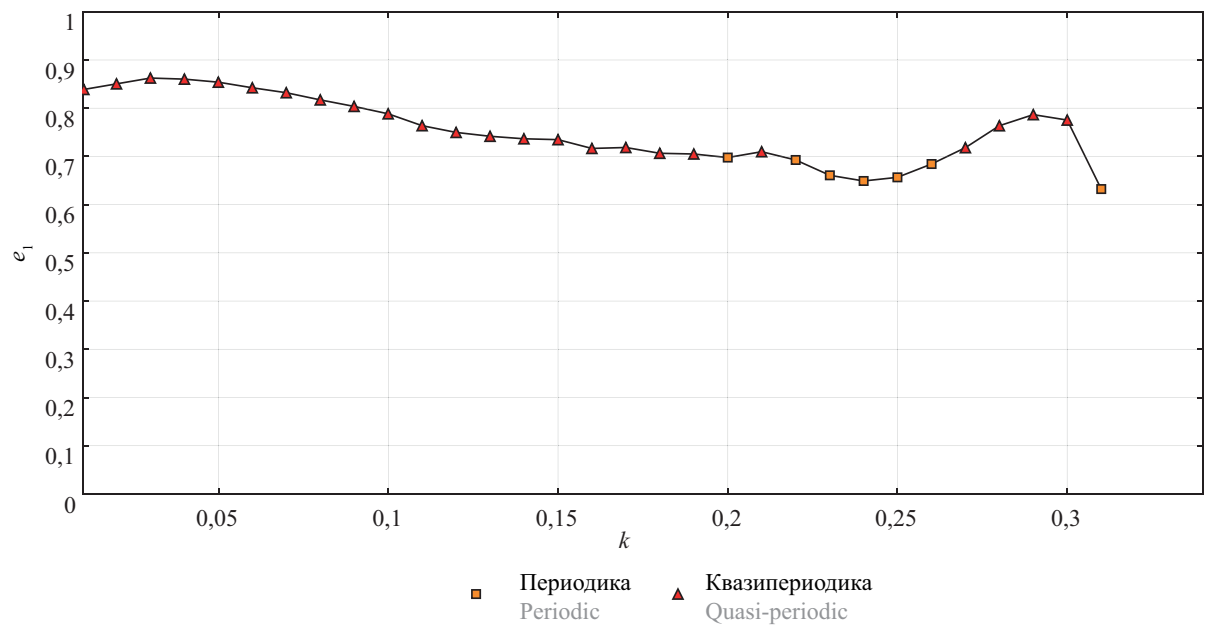


Рис. 4. Зависимость $e_1(k)$ при фиксированной $B = 12,0$
Fig. 4. Dependence of $e_1(k)$ with a fixed $B = 12.0$

Сравнение с классическими результатами
Comparison with classical results

Параметр Parameter	Граница хаоса по Ю. Уэде [9] Ueda's chaos boundary	Получено (метод Розенштейна) Received (Rozenstein method)	Характер перехода Nature of the transition
B_c при $k = 0,10$ B_c when $k = 0.10$	$\approx 11,8$	11,9–12,2	Периодика $\rightarrow$ хаос Periodic $\rightarrow$ chaos
k_c при $B = 12,0$ k_c when $B = 12.0$	$\approx 0,25$	0,26–0,30	Хаос $\rightarrow$ стабилизация Chaos $\rightarrow$ stabilization
$B < 10.0$	Регулярное движение Regular movement	Подтверждено Confirmed	Периодика / Periodic

из временного ряда выбирались 4000 точек для анализа.

Для каждого набора параметров (B, k) формировалось сечение Пуанкаре в моменты $t_n = 2\pi n/\omega$. Полученные множества $(x_n, \dot{x}_n)$ использовались для визуального анализа и расчета экспонентоподобной величины e_1 .

Метод оценки экспонентоподобной величины e_1

В отличие от Ю. Уэды [14], где границы хаоса определялись по геометрической структуре аттрактора, в данной работе используется метод Розенштейна [17, 18], предназначенный для расчета максимального показателя Ляпунова по одномерному сигналу $x(t)$.

Метод основан на анализе расхождения соседних траекторий в реконструированном фазовом пространстве:

$$Y_i = [x_i, x_{i+\tau}, x_{i+2\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}], \tag{2}$$

где m — размерность вложения; τ — задержка, определяемая автокорреляцией сигнала.

Для каждой пары ближайших векторов Y_i и $Y_{j(t)}$ вычисляется среднее расстояние:

$$d_{(i,j)} = \|Y_i - Y_j\| \tag{3}$$

и отслеживается его рост во времени:

$$\langle \ln d(t) \rangle \approx e_1 t + C, \tag{4}$$

где коэффициент e_1 соответствует локальной экспоненте расходимости. Для регулярных движений $e_1 \approx 0$, для хаотических $e_1 > 0$.

В данном исследовании использовано усреднение по ансамблю близких траекторий с коррекцией на «временной зазор» (Theiler window) $\Delta_t = 0,5f_s$, что исключает автокорреляционные искажения.

Критерии классификации режима движения

Для каждого режима применялась следующая классификация:

- периодика — $e_1 < 0,7$;
- квазипериодика — $(0,7 \leq e_1 < 0,95)$;
- хаос — $(e_1 \geq 0,95$ или $|\Delta e_1| > 0,15)$.

Классификация выполнялась автоматически в MATLAB, а графики $e_1(B)$ и $e_1(k)$ строились с цвето-

вой дифференциацией по типу режима (оранжевые — периодические, красные — квазипериодические, черные — хаотические).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ результатов вычислений

Изменение режима при росте амплитуды B

На рис. 1 представлены сечения Пуанкаре при $k = 0,10$. При малых амплитудах $B < 10,0$ наблюдается регулярная периодика, далее формируется двухчленный аттрактор, переходящий в квазипериодический (рис. 1, *e, f*). В диапазоне $B = 11,9–12,2$ происходит переход к хаосу — траектория становится неупорядоченной и заполняет фазовое пространство.

Соответствующая зависимость $e_1(B)$ (рис. 2) демонстрирует рост экспоненты в интервале $B > 11,8$, что подтверждает переход в хаотическое состояние.

Влияние демпфирования k

При фиксированной амплитуде $B = 12,0$ (рис. 3) видно, что с ростом демпфирования хаотические области постепенно исчезают. Уже при $k > 0,25$ система возвращается в квазипериодический режим, а при $k \geq 0,3$ — полностью стабилизируется. Зависимость $e_1(k)$ представлена на рис. 4.

Сравнение с классическими результатами

В таблице приведено сравнение с классическими результатами.

Использование метода Розенштейна позволило уточнить границы хаотических режимов с точностью до $\pm 0,05$ по B и $\pm 0,01$ по k , что подтверждает его эффективность по сравнению с визуальными критериями Ю. Уэды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование подтверждает, что переход к хаосу в осцилляторе Дуффинга происходит при достижении критических амплитуд возбуждения. Методика Розенштейна дает возможность количественно оценивать степень хаотичности без необходимости построения глобального аттрактора, что повышает устойчивость анализа при шумных данных.

Полученные результаты важны для инженерных задач сейсмоизоляции и виброзащиты, где элементы с нелинейными характеристиками могут демонстрировать аналогичные переходы. Учет границ хаоса позволяет корректно выбирать демпфирующие свойства и исключать резонансные состояния, приводящие к разрушению конструкций [19, 20].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Nayfeh A.H., Mook D.T. Nonlinear Oscillations. Wiley, 1979.
2. Strogatz S.H. Nonlinear Dynamics and Chaos. CRC Press, 2018. DOI: 10.1201/9780429492563
3. Tanekou S.Ts., Ramadoss Ja., Kengne Ja., Kenmoe G.D., Rajagopal K. Coexistence of Periodic, Chaotic and Hyperchaotic Attractors in a System Consisting of a Duffing Oscillator Coupled to a van der Pol Oscillator // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2023. Vol. 33. Issue 2. DOI: 10.1142/S0218127423300045. EDN XALVGC.
4. Kuznetsov S.V. Forced harmonic vibrations of duffing oscillator with cubic-quintic spring nonlinearity // Chaos, Solitons & Fractals. 2025. Vol. 199. Issue 1. DOI: 10.1016/j.chaos.2025.116699. EDN KKPYUH.
5. Da L., Soares I., Krol M.F., Rech P.C. Coexisting attractors and basins of attraction of an extended forced Duffing oscillator // The European Physical Journal B. 2024. Vol. 97. Issue 6. P. 71. DOI: 10.1140/epjb/s10051-024-00709-0. EDN JWBVIF.
6. Moon F.C. Chaotic Vibrations: An Introduction for Applied Scientists and Engineers. Wiley, 1987.
7. Kovacic I., Brennan M.J. The Duffing Equation. Wiley, 2011. DOI: 10.1002/9780470977859
8. Thompson J.M.T., Stewart H.B. Nonlinear Dynamics and Chaos: Geometrical Methods for Engineers and Scientists. Wiley, 2002.
9. Rand R.H. Lecture Notes on Nonlinear Vibrations. Cornell University, 2005.
10. Chen G., Ueta T. Chaos in Circuits and Systems // World Scientific Series on Nonlinear Science Series B. 2002. DOI: 10.1142/4945
11. Guckenheimer J., Holmes P. Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields // Applied Mathematical Sciences. 1983. DOI: 10.1007/978-1-4612-1140-2
12. Montenegro Joo J. Evolution of the Lyapunov Exponent during a Chaotic Event in the Nonlinear Damped and Forced Oscillator // Chaos and Complexity Letters. 2022. Vol. 16. Issue 1.
13. Abohamer Mk., Amer Ts., Arab A., Galal Aa. Analyzing the chaotic and stability behavior of a duffing oscillator excited by a sinusoidal external force // Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. 2024. Vol. 44. Issue 2. Pp. 969–986. DOI: 10.1177/14613484241298998. EDN PUDJES.
14. Ueda Y. Randomly transitional phenomena in the system governed by Duffing's equation // Journal of Statistical Physics. 1979. Vol. 20. Issue 2. Pp. 181–196. DOI: 10.1007/bf01011512. EDN WDFUCD.
15. Wolf A., Swift J.B., Swinney H.L., Vastano J.A. Determining Lyapunov exponents from a time series // Physica D: Nonlinear Phenomena. 1985. Vol. 16. Issue 3. Pp. 285–317. DOI: 10.1016/0167-2789(85)90011-9

16. Kantz H., Schreiber T. Nonlinear Time Series Analysis. Cambridge University Press, 2004. DOI: 10.1017/cbo9780511755798

17. Rosenstein M.T., Collins J.J., De Luca C.J. A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1993. Vol. 65. Issue 1–2. Pp. 117–134. DOI: 10.1016/0167-2789(93)90009-p

18. Gao J.B., Zheng Z., Sanjuán M.A.F. Chaos Theory and Complex Systems. Springer, 2020.

19. Luongo A., Zulli D. Nonlinear dynamic models for seismic isolation systems // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2014. Vol. 58. Pp. 156–166.

20. Casciati F., Rodellar J. Smart Structures: Innovative Systems for Seismic Response Control. WIT Press, 2011.

Поступила в редакцию 17 ноября 2025 г.

Принята в доработанном виде 27 ноября 2025 г.

Одобрена для публикации 11 января 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Юлия Владимировна Азарова — аспирант; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; azarovauv@yandex.ru;

Даниил Николаевич Казаков — аспирант; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; denialkazakov9@mail.ru;

Владимир Андреевич Бунин — аспирант; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-0271-8193; buninw2001@gmail.com;

Сергей Владимирович Кузнецов — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 7202573564, ResearcherID: H-9448-2013, ORCID: 0000-0001-9426-0791; KuznetsovSV@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Азарова Ю.В. — сбор и обработка материала, написание исходного текста, итоговые выводы.

Казаков Д.Н. — доработка текста, написание и оформление статьи.

Бунин В.А. — доработка текста, написание и оформление статьи.

Кузнецов С.В. — идея, научное руководство, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Nayfeh A.H., Mook D.T. *Nonlinear Oscillations*. Wiley, 1979.

2. Strogatz S.H. *Nonlinear Dynamics and Chaos*. CRC Press, 2018. DOI: 10.1201/9780429492563

3. Tanekou S.Ts., Ramadoss Ja., Kengne Ja., Kenmoe G.D., Rajagopal K. Coexistence of Periodic, Chaotic and Hyperchaotic Attractors in a System Consisting of a Duffing Oscillator Coupled to a van der Pol Oscillator. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2023; 33(2). DOI: 10.1142/S0218127423300045. EDN XALVGC.

4. Kuznetsov S.V. Forced harmonic vibrations of duffing oscillator with cubic-quintic spring nonlinearity. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2025; 199(1). DOI: 10.1016/j.chaos.2025.116699. EDN KKPYUH.

5. Da L., Soares I., Krol M.F., Rech P.C. Coexisting attractors and basins of attraction of an extended forced Duffing oscillator. *The European Physical Journal B*. 2024; 97(6):71. DOI: 10.1140/epjb/s10051-024-00709-0. EDN JWBVIF.

6. Moon F.C. *Chaotic Vibrations: An Introduction for Applied Scientists and Engineers*. Wiley, 1987.

7. Kovacic I., Brennan M.J. *The Duffing Equation*. Wiley, 2011. DOI: 10.1002/9780470977859

8. Thompson J.M.T., Stewart H.B. *Nonlinear Dynamics and Chaos: Geometrical Methods for Engineers and Scientists*. Wiley, 2002.

9. Rand R.H. *Lecture Notes on Nonlinear Vibrations*. Cornell University, 2005.

10. Chen G., Ueta T. Chaos in Circuits and Systems. *World Scientific Series on Nonlinear Science Series B*. 2002. DOI: 10.1142/4945

11. Guckenheimer J., Holmes P. Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields. *Applied Mathematical Sciences*. 1983. DOI: 10.1007/978-1-4612-1140-2

12. Montenegro Joo J. Evolution of the Lyapunov Exponent during a Chaotic Event in the Nonlinear Damped and Forced Oscillator. *Chaos and Complexity Letters*. 2022; 16(1).

13. Abohamer Mk., Amer Ts., Arab A., Galal Aa. Analyzing the chaotic and stability behavior of a duffing oscillator excited by a sinusoidal external force. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2024; 44(2):969-986. DOI: 10.1177/14613484241298998. EDN PUDJES.
14. Ueda Y. Randomly transitional phenomena in the system governed by Duffing's equation. *Journal of Statistical Physics*. 1979; 20(2):181-196. DOI: 10.1007/bf01011512. EDN WDFUCD.
15. Wolf A., Swift J.B., Swinney H.L., Vastano J.A. Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1985; 16(3):285-317. DOI: 10.1016/0167-2789(85)90011-9
16. Kantz H., Schreiber T. *Nonlinear Time Series Analysis*. Cambridge University Press, 2004. DOI: 10.1017/cbo9780511755798
17. Rosenstein M.T., Collins J.J., De Luca C.J. A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1993; 65(1-2):117-134. DOI: 10.1016/0167-2789(93)-90009-p
18. Gao J.B., Zheng Z., Sanjuán M.A.F. *Chaos Theory and Complex Systems*. Springer, 2020.
19. Luongo A., Zulli D. Nonlinear dynamic models for seismic isolation systems. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2014; 58:156-166.
20. Casciati F., Rodellar J. *Smart Structures: Innovative Systems for Seismic Response Control*. WIT Press, 2011.

Received November 17, 2025.

Adopted in revised form on November 27, 2025.

Approved for publication on January 11, 2026.

B I O N O T E S : **Yulia V. Azarova** — postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; azarovauv@yandex.ru;

Daniil N. Kazakov — postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; denialkazakov9@mail.ru;

Vladimir A. Bunin — postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0271-8193; buninw2001@gmail.com;

Sergey V. Kuznetsov — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Department; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 7202573564, ResearcherID: H-9448-2013, ORCID: 0000-0001-9426-0791; KuznetsovSV@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Yulia V. Azarova — collection and processing of materials, writing of the initial text, final conclusions.

Daniil N. Kazakov — text revision, writing, and formatting of the article.

Vladimir A. Bunin — text revision, writing, and formatting of the article.

Sergey V. Kuznetsov — idea, academic advising, scientific editing of the text.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Численное моделирование укрепления береговой линии реки Волги для обустройства пешеходной дорожки к водоему

Роман Николаевич Никоноров^{1,2}, Ульяна Олеговна Московкина¹,
Екатерина Алексеевна Софронова¹

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. Сооружение объектов на береговых линиях является дорогостоящей задачей, пользующейся ограниченным спросом. При разработке проектных решений возведения данных объектов требуется учитывать ряд дополнительных задач, например, таких как разработка мероприятий по укреплению склонов и защите грунтового массива от эрозии. В процессе выполнения проектных работ следует дополнительно принимать во внимание технические и технологические возможности реализации проекта в условиях опасных склоновых процессов.

Материалы и методы. Разнообразие условий возведения проектируемых на береговой линии объектов обуславливает ограниченность применения типовых решений, в результате чего возникает необходимость разработки индивидуального комплекса решений для каждого объекта, начиная с принципиального выбора технологических и конструктивных решений. Рассмотрены геотехнические аспекты проектирования инженерной защиты склона береговой линии р. Волги в районе д. Черкасово в рамках реализации проекта по благоустройству с учетом технологических и конструктивных особенностей территории.

Результаты. Выполнено численное моделирование производства работ на существующей площадке проектирования с оценкой устойчивости склона при условии проведения защитных мероприятий. Получены результаты оценки устойчивости грунтового массива.

Выводы. Проанализированы и представлены наиболее значимые факторы, влияющие на определение оптимальных конструктивных решений, предложены возможные варианты отдельных геотехнических решений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: устойчивость склона, инженерная защита, благоустройство, берегоукрепительные мероприятия, численное моделирование, геотехнические решения

Благодарности. Авторы выражают признательность рецензенту, чьи подробные комментарии и рекомендации помогли повысить качество статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Никоноров Р.Н., Московкина У.О., Софронова Е.А. Численное моделирование укрепления береговой линии реки Волги для обустройства пешеходной дорожки к водоему // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 6. С. 906–921. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.906-921

Автор, ответственный за переписку: Роман Николаевич Никоноров, nikonorov.rn@nizta.ru.

Numerical modeling of Volga River bank stabilization for the development of a pedestrian path to the water body

Roman N. Nikonorov^{1,2}, Ulyana O. Moskovkina¹, Ekaterina A. Sofronova¹

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

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

ABSTRACT

Introduction. Construction of facilities on riverbanks is a costly task with limited demand. A number of supplementary issues should be taken into account when developing design solutions for their construction. These issues include the development of slope stabilization measures and protection of the soil mass from erosion. The technical and technological feasibility of implementing such projects under conditions of hazardous slope processes should also be considered in the course of design development.

Materials and methods. The variety of conditions under which facilities on riverbanks are constructed limits the applicability of standard solutions; as a result, an individual set of solutions becomes necessary for each facility, beginning with the fundamental selection of technological and structural solutions. The geotechnical aspects of designing engineering protection facilities for the Volga riverbank slope near the village of Cherkasovo are considered within the framework of an improvement project, taking into account the technological and structural features of the site.

Results. Numerical modeling of construction operations at the existing project site was performed to assess slope stability after the implementation of protective measures. The analysis provided stability assessment results for the soil mass.

Conclusions. The most significant factors influencing the selection of optimal structural solutions were analyzed and presented, and possible options for specific geotechnical solutions were proposed.

KEYWORDS: slope stability, engineering protection, site improvement, bank protection measures, numerical modeling, geotechnical solutions

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the reviewer, whose detailed comments and recommendations helped improve the quality of the article.

FOR CITATION: Nikonorov R.N., Moskovkina U.O., Sofronova E.A. Numerical modeling of Volga River bank stabilization for the development of a pedestrian path to the water body. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(6):906-921. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.906-921 (rus.).

Corresponding author: Roman N. Nikonorov, nikonorov.rn@nizta.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваемый участок склона расположен на берегу р. Волги в Тверской области. Территория находится под сельской застройкой. Овражно-балочная сеть развита слабо, местность имеет резкий склон в сторону реки в непосредственной близости от нее. На участке один водный объект — р. Волга в подпоре от Угличского гидроузла. В соответствии с результатами гидрометеорологических изысканий выявлен размыв грунта в зоне течения реки со средней скоростью 20 см/год.

Расположение и архитектурные решения благоустройства спуска показаны на рис. 1.

Инженерно-геологические условия площадки

Инженерно-геологические условия площадки на изученной глубине 20 м представлены насыпными, песчаными и глинистыми грунтами различного генезиса. Геологическое строение территории состоит из следующих геолого-генетических комплексов отложений:

- 1) современные техногенные отложения (tQIV);
- 2) современные склоновые отложения (dQIV);
- 3) верхнепермские отложения татарского яруса (P2t).

Специфические грунты на рассматриваемом участке имеют насыпные грунты (tQIV) ИГЭ-1 и ИГЭ-1в

мощностью до 1,6 м. Насыпные грунты — слежавшиеся насыпные отложения (плановая разновозрастная отсыпка возрастом более 10 лет). Насыпной грунт (ИГЭ-1) песчаного состава содержит пески средней крупности; насыпной грунт глинистого состава (ИГЭ-1в) — суглинки полутвердые, прослой твердые, мощностью от 0,05 до 1,0 м.

Среди важнейших специфических особенностей техногенных грунтов, отрицательно влияющих на их инженерно-геологическую оценку, следует отметить:

- значительную неоднородность по составу и неравномерную сжимаемость;
- возможность самоуплотнения от собственного веса, особенно при вибрационных воздействиях.

Водовмещающими грунтами являются пески различной крупности с прослоями и линзами супесей, суглинков, глин. Горизонт безнапорный, типа «верховодка». Горизонт хорошо водопроницаемый. Нижний водоупор — литологический — глинистые коренные отложения позднепермского возраста.

Глубина залегания грунтовых вод при вскрытии в апреле от 0,8 до 4,5 м. Коэффициент фильтрации от 12,38 до 23,27 м/сут в зависимости от плотности сложения песков. Питание водоносного горизонта осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, а также подтока из водоносного комплек-

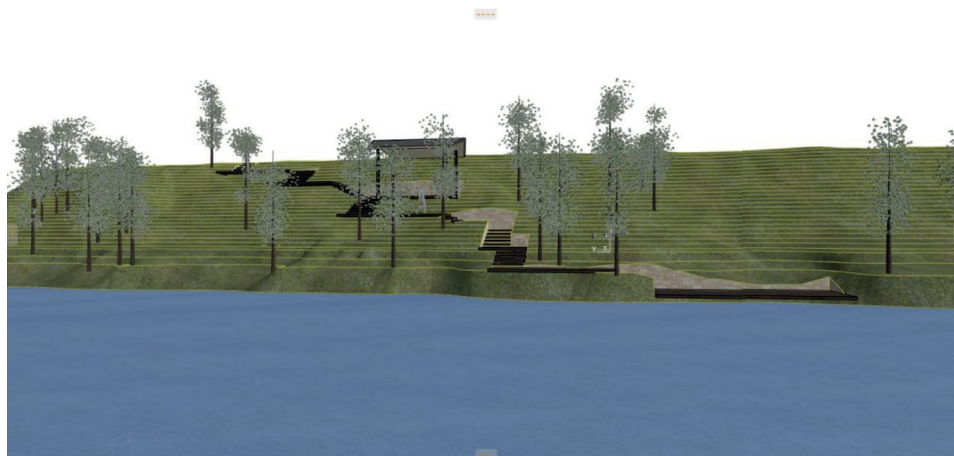


Рис. 1. Расположение и архитектура спуска

Fig. 1. Location and architectural design of the descent to the water

Табл. 1. Нормативные и расчетные характеристики грунтов
Table 1. Characteristic values of soil parameters

Номер ИГЭ Numbered engineering- geological units	Наименование ИГЭ Types of engineering- geological units	Рекомендуемые нормативные значения характеристик Recommended design values of soil properties					При $\alpha = 0,85$ / If $\alpha = 0,85$			При $\alpha = 0,95$ / If $\alpha = 0,95$		
		ρ , г/см ³ ρ , g/cm ³	φ , град φ , degrees	C, кПа C, kPa	E, МПа E, MPa	ρ , г/см ³ ρ , g/cm ³	φ , град φ , degrees	C, кПа C, kPa	ρ , г/см ³ ρ , g/cm ³	φ , град φ , degrees	C, кПа C, kPa	
1	Насыпной грунт песчаного состава: пески средней крупности / Fill soil of sandy composition: medium-grained sands	1,81 2,01*	37(34)/32(28)	2(1)/1(1)	21	1,84 2,08	37(33)/31(27)	1(1)/1(1)	1,85 2,13	36 (33)/ 30(26)	1(1)/1(1)	
1b	Насыпной грунт глинистого состава: суглинки, полутвердые, прослоями твердые Fill soil of clayey composition: semi-hard loams, with hard interlayers	1,97	(17)/14(14)	(36)/25(25)	7	1,99	(16)/13(13)	(33)/22(22)	2,00	(15)/13(13)		30/20(20)
6	Суглинки, твердые, прослоями полутвердые Hard loams, with semi-hard interlayers	1,94	24/22(22)	40/28(18)	25	1,96	23/21(20)	37/26(17)	1,97	23/21(20)		35/24(16)
7	Глины твердые, прослоями полутвердые Hard clays, with semi-hard interlayers	1,95	21/(21)	63/(28)	21	1,95	20/(20)	57/(25)	1,95	20/(19)		52/(23)

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Номер ИГЭ Numbered engineering- geological units	Наименование ИГЭ Types of engineering- geological units	Рекомендуемые нормативные значения характеристик Recommended design values of soil properties					При $\alpha = 0,85$ / If $\alpha = 0,85$			При $\alpha = 0,95$ / If $\alpha = 0,95$		
		ρ , г/см ³ ρ , g/cm ³	φ , град φ , degrees	C , кПа C , kPa	E , МПа E , MPa	ρ , г/см ³ ρ , g/cm ³	φ , град φ , degrees	C , кПа C , kPa	ρ , г/см ³ ρ , g/cm ³	φ , град φ , degrees	C , кПа C , kPa	
10a	Пески пылеватые, средней плотности, влажные, водонасыщенные Silty sands, medium dense, moist to saturated	1,76 1,92	31/(23)	3/(3)	22	1,81 1,97	30/(24)	3/(3)	1,83 2,00	30/(22)	3/(3)	
10b	Пески пылеватые, рыхлые, влажные Silty sands, loose, moist	1,71	28/(25)	2/(2)	14	1,79	27/(24)	2/(1)	1,84	27/(23)	2/(1)	
11	Пески пылеватые, плотные, влажные, водонасыщенные Silty sands, dense, moist to saturated	1,93 2,09	36/(32)	7/(4)	30	2,06 2,19	35/(30)	7/(3)	2,15 2,27	34/(29)	7/(3)	
11c	Супеси твердые, прослоями пластичные Hard sandy loams, with plastic interlayers	1,97	30/(12)	26/(11)	39	1,98	29/(12)	25/(10)	1,99	28/(11)	24/(10)	

Примечание: * — принято на основании архивных данных. Прочностные характеристики приведены в числителе для водонасыщенного состояния, в знаменателе — по результатам среза «плашка по плашке» по сухой (по смоченной) поверхности.
Note: * — adopted based on archival data. Strength characteristics are given in the numerator for the water-saturated state and in the denominator based on the results of a direct shear test, “plate against plate”, on a dry/wetted surface.

са, приуроченного к четвертичным склоновым отложениям борта долины и из водоносного комплекса верхнепермского горизонта. В периоды паводка уровень потенциального повышения данного горизонта может подниматься на 1,5–2,0 м из-за эффекта подпора паводковыми водами р. Волги.

В табл. 1 приведены основные нормативные и расчетные характеристики грунтов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Учитывая неоднородность напластования и физико-механических свойств грунтов рассматриваемого склона, можно предположить возможное скольжение [1–3] и обрушение грунтов [4–7] при производстве работ по благоустройству береговой линии, включающей в себя не только возведение пешеходных настилов, но и подрезку насыпных грунтов.

К определению возможных поверхностей скольжения при потере устойчивости грунтов склона можно подойти, пользуясь различными методами [8–18], среди них:

1) метод Феллениуса, который учитывает только сумму моментов всех сил, удерживающих откос;

2) метод Шахунянца, учитывающий равновесие сил по направлению скольжения и нормальные усилия между отсеками, на которые была разбита призма скольжения;

3) метод Ямбу исходит из равновесия сил по направлению скольжения и нормальных усилий между отсеками, на которые была разбита призма скольжения;

4) метод Спенсера принимает во внимание все воздействия: равновесие сил по направлению скольжения; нормальные усилия между отсеками, на которые была разбита призма скольжения; сумму моментов всех сил, удерживающих откос; касательные усилия между отсеками;

5) метод Моргенштерна – Прайса учитывает все воздействия: равновесие сил по направлению скольжения; нормальные усилия между отсеками, на которые была разбита призма скольжения; сумму моментов всех сил, удерживающих откос; касательные усилия между отсеками;

6) метод Бишоп рассматривает сумму моментов всех сил, удерживающих откос и нормальные усилия между отсеками, на которые была разбита призма обрушения;

7) метод касательных сил учитывает только равновесие сил по направлению скольжения;

8) численное моделирование с использованием метода конечных элементов, метода конечных разностей, метода дискретных элементов и других методов [19–23].

Все расчетные методы оценки степени устойчивости склонов основаны на применении теории предельного равновесия, рассматривающей предельное напряженное состояние грунтового массива.

Варианты укрепления склона [24–29] площадки:

1. Георешетки¹.

Георешетка применяется для укрепления склонов с целью устранения сыпучести слабых грунтов и обеспечения эффективного дренажа². Устройство георешетки³ не препятствует фильтрации влаги и не нарушает режимы питания растений и газонов. Ячеистая конструкция также позволяет предотвратить разрушение почвенного слоя на откосах. Данный вариант замедляет процесс эрозии поверхности склона, но не увеличивает сопротивление склона оползневым процессам.

2. Лесонасаждение.

Для дополнительного укрепления склона также возможно использование лесонасаждений в сочетании с посевом многолетних трав или одерновкой. Устойчивость достигается за счет корневой системы деревьев и кустарников, которая пронизывает грунт на различную глубину и создает прочный каркас, однако степень оценки эффективности укрепления склона сложно прогнозируется.

3. Ограждающие консольные конструкции с применением армирующих элементов.

Подпорные стенки в местах подрезки грунта для обустройства площадок спуска могут быть выполнены следующих видов:

- шпунтовое ограждение;
- свайное ограждение, выполняемое из буронабивных, буросекущихся, буросекательных, забивных и других видов свай;
- стальные элементы из прокатного профиля с деревянной или композитной заборкой;
- монолитная стена в грунте. Технология устройства монолитной подземной стены непосредственно в грунте без разработки открытого котлована. Является дорогостоящей и не востребуемой в сложных геологических и геоморфологических условиях и принятых конструктивных решениях рассматриваемого объекта строительства, при суммарной длине ограждающих конструкций составляет 20 м;
- сборная стена в грунте. Стена в грунте, устраиваемая из сборных (предварительно изготовленных железобетонных, стальных, деревянных, композитных и т.п.) элементов, погружаемых забивкой или вдавливанием без выемки грунта с помощью молотов, вибропогружателей, вибровдавливающих, виброударных, вдавливающих и вращательно-вдавливающих устройств;
- ограждение из грунтоцементных элементов, изготавливаемых путем смешивания местного грунта

¹ ГОСТ Р 56708–2015. Георешетка полимерная гексагональная. Технические условия. М., 2015.

² ОДМ 218.2.051–2015. Рекомендации по проектированию и расчету противооползневых сооружений на автомобильных дорогах. М., 2015.

³ СТО 30478650-001–2012. Георешетка дорожная армированная (РД). Технические условия. М., 2012.

с цементным раствором непосредственно на площадке производства работ.

Каждый из представленных вариантов крепления грунта имеет свои преимущества и недостатки как конструктивные, так и технологические. В статье рассмотрен вариант устройства ограждения в виде сборной стены в грунте.

4. Предотвращение размыва грунтов в зоне постоянного контакта с водой.

Одним из вариантов реализации мероприятий по обеспечению сохранности грунтов береговой линии в зоне постоянного контакта с водой является устройство ограждающих конструкций с применением:

- стальных элементов;
- железобетонных элементов;
- элементов из композитных материалов;
- деревянных конструкций. Особенно долговечно и надежно ведут себя конструкции из лиственницы.

Выбор варианта защиты грунта в зоне постоянного контакта с водой от размыва необходимо оценивать не только с точки зрения экономической эффективности, но и с позиции коррозионной стойкости, доступности подбираемых материалов и возможностей устройства в сложившихся условиях. Технология возведения подпорной стены из лиственничных бревен наиболее проста и менее затратна. В сложившихся гидрометеорологических условиях в зоне постоянного контакта береговой линии с водой оптимальным будет вариант конструкции из бревен лиственницы.

Также для предотвращения суффозионных и эрозийных процессов верхних слоев грунта может быть выполнена засыпка пространства между ограждающей конструкцией и существующей поверхностью склона щебнем, песком и булыжниками.

Проектные решения площадки строительства предполагают устройство спуска к воде в виде шести горизонтально расположенных платформ, выполненных из плит, соединенных между собой лестницами с возведением беседки на одной из платформ. Установка плит предусматривается на естественном основании. Одна из платформ частично находится над водой, ее опирание предусмотрено в виде опор из трубобетона диаметром 388 мм с заполнением бетоном класса по прочности не ниже В25, марки водонепроницаемости не менее W8, класса по морозостойкости F200. Материал платформ — бетон класса по прочности В25 толщиной 250 мм. Облицовочные и ограждающие материалы подпорных стен изготавливаются из бетона класса по прочности не ниже В20, по водонепроницаемости не ниже W4 в местах выше прогнозируемого уровня поднятия вод и не ниже W8 в местах ниже уровня вод, по морозостойкости не ниже F200.

Исходя из проектных решений и вышеизложенных вариантов обеспечения устойчивости склона в качестве защитных мероприятий принимаются:

- устройство подпорных стен выше прогнозируемого уровня воды выполняется в виде сборной сте-

ны в грунте, устойчивость которой обеспечивается заделкой в грунт;

- ограждающие конструкции вдоль береговой линии выполняются из бревен лиственницы диаметром 300 мм с шагом, равным их диаметру;
- планировка поверхности путем срезки насыпного слоя грунта;
- засыпка пространства между ограждающей конструкцией и существующей поверхностью склона щебнем, песком и булыжниками.

В представленном исследовании для определения устойчивости многоуровневого неоднородного склона использовался сертифицированный в РФ программный комплекс (ПК) Plaxis 2D. В качестве анализируемого показателя рассматривается коэффициент запаса устойчивости склона — показатель отношения сил, удерживающих массив грунта на наклонной поверхности, к силам, сдвигающим этот массив.

Численным методом коэффициент устойчивости определяется последовательным снижением расчетных значений характеристик сопротивления сдвигу грунта ϕ , c до ϕ' , c' , соответствующих предельному состоянию склона при учете фактических геологических и гидрогеологических условий.

Численные расчеты выполнялись с применением модели Мора — Кулона в соответствии с результатами данных инженерно-геологических изысканий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчеты в ПК Plaxis 2D проводились в соответствии с проектируемыми стадиями производства работ по объекту:

1. Загружение собственным весом грунта и определение начального напряженно-деформированного состояния грунтового массива.
2. Выполнение срезки насыпного слоя в соответствии с проектными решениями для предотвращения атмосферной эрозии берегового склона и дальнейшего устройства георешетки.

Деформированная сетка и изополя общих деформаций представлены на рис. 2, 3.

Призма скольжения и данные по расчету устойчивости грунтового массива на этапе срезки насыпного слоя приведены на рис. 4, 5.

3. Устройство ограждающей конструкции из бревен вдоль береговой линии.

4. Устройство ограждающих конструкций типа «стена в грунте» из сборного железобетона в зоне расположения пешеходных платформ и дорожек с целью предотвращения местной потери устойчивости склона и развития негативных последствий.

На рис. 6 представлена деформированная сетка на этапе завершения работ 3-й и 4-й стадий расчета. Общие перемещения приведены на рис. 7.

Вид призмы скольжения после устройства ограждающих конструкций 3-й и 4-й стадий расчета приведен на рис. 8, данные по результатам оцен-

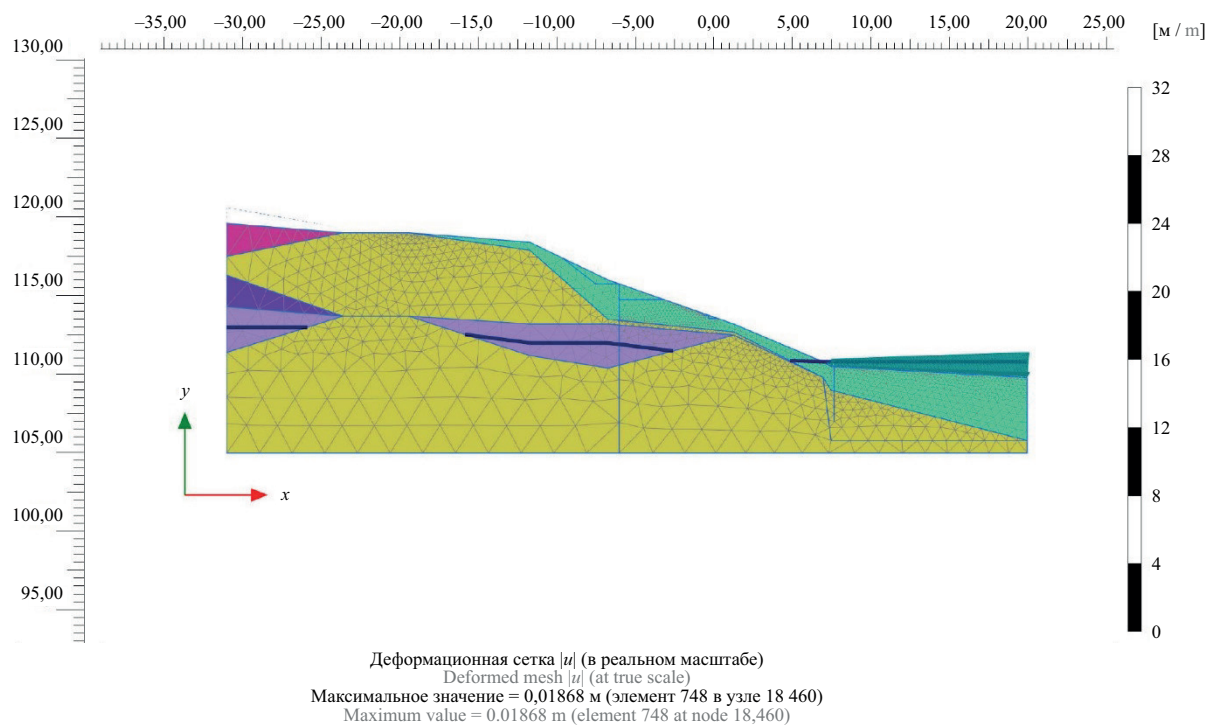


Рис. 2. Деформированная сетка на стадии срезки ИГЭ-1
Fig. 2. Deformed mesh at the shear stage of EGU-1

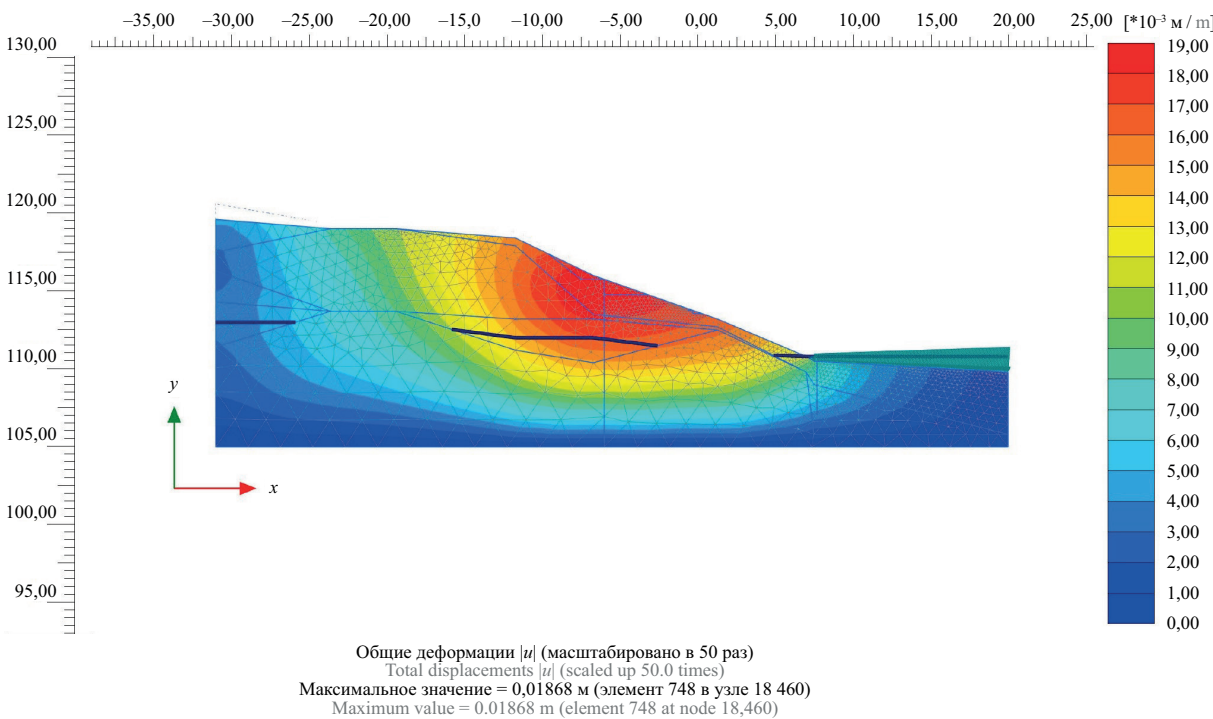


Рис. 3. Общие перемещения на стадии срезки ИГЭ-1
Fig. 3. Total displacements at the shear stage of EGU-1

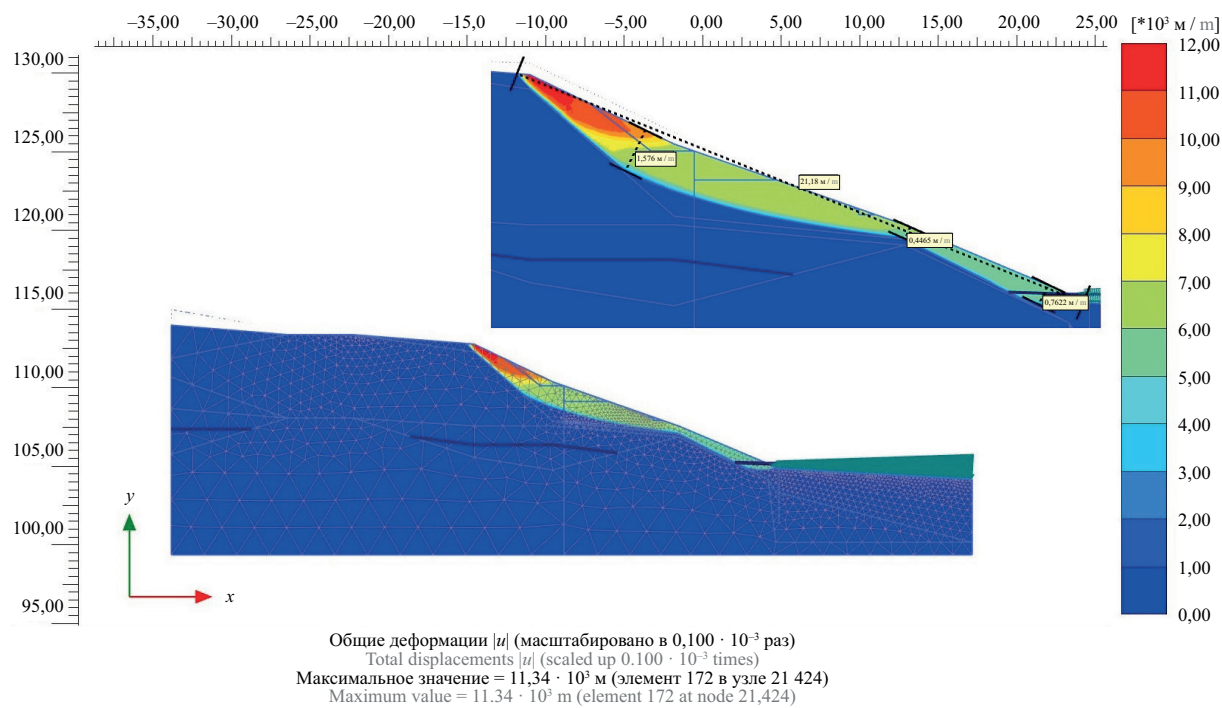


Рис. 4. Призма скольжения на стадии срезки ИГЭ-1

Fig. 4. Sliding prism at the shear stage of EGU-1

Информация о шаге / Step info				
Фаза / Phase	Уст срезка [Phase_11] / Stab cuting (фаза_11)			
Шаг / Step	Начальный / Initial			
Режим расчета / Calulation mode	Классический режим / Classical mode			
Тип шага / Step type	Безопасность / Safety			
Обновленная сетка Updated mesh	Нет / False			
Тип решателя / Solver type	Пикос / Picos			
Тип ядра / Kernel type	64 бит / 64 bit			
Коэффициент экстраполяции Extrapolation factor	2,000			
Относительная жесткость Relative stiffness	−1,778E ^{−12}			
Множители / Multipliers				
Вес грунта / Soil weight			$\sum M_{Weight}$	1,000
Коэффициент снижения прочности Strength reduction factor	M_{sf}	−0,05977E ^{−3}	$\sum M_{sf}$	1,846
Время / Time	Приращение Increment	0,000	Конечное время End time	0,000
Поэтапное строительство / Staged construction				
Активная доля общей площади Active proportion total area	M_{Area}	0,000	$\sum M_{Area}$	0,9715
Активная доля этапа Active proportion of stage	M_{Stage}	0,000	$\sum M_{Stage}$	0,000
Силы / Forces				
F_x	0,000 кН/м / kN/m			
F_y	0,000 кН/м / kN/m			
Консолидация / Consolidation				
Реализованное избыточное давление, макс Realised $P_{Excess,Max}$	0,000 кН/м ² / kN/m ²			

Рис. 5. Информация о расчетном этапе на фазе срезки ИГЭ-1 ($k_{уст}$)

Fig. 5. Calculation-stage information for the EGU-1 shear phase (k_{sf})

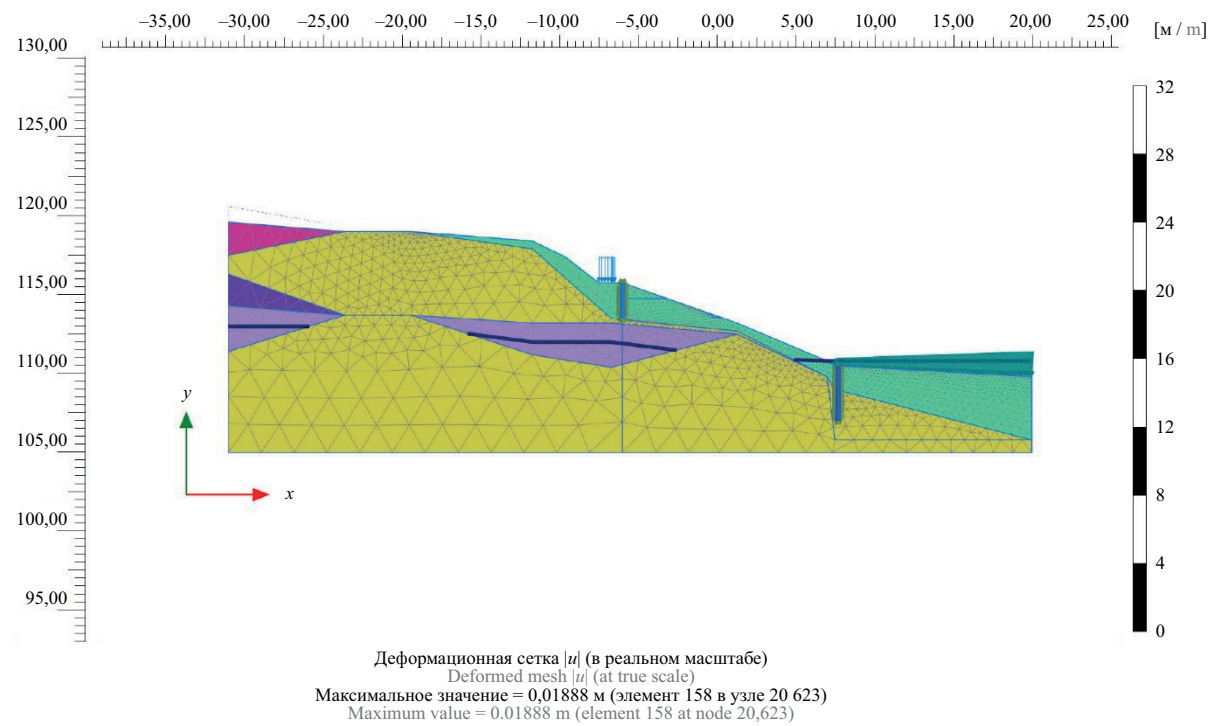


Рис. 6. Деформированная сетка на стадии устройства ограждения из сборного железобетона
Fig. 6. Deformed mesh at the stage of installing the precast reinforced concrete retaining structure

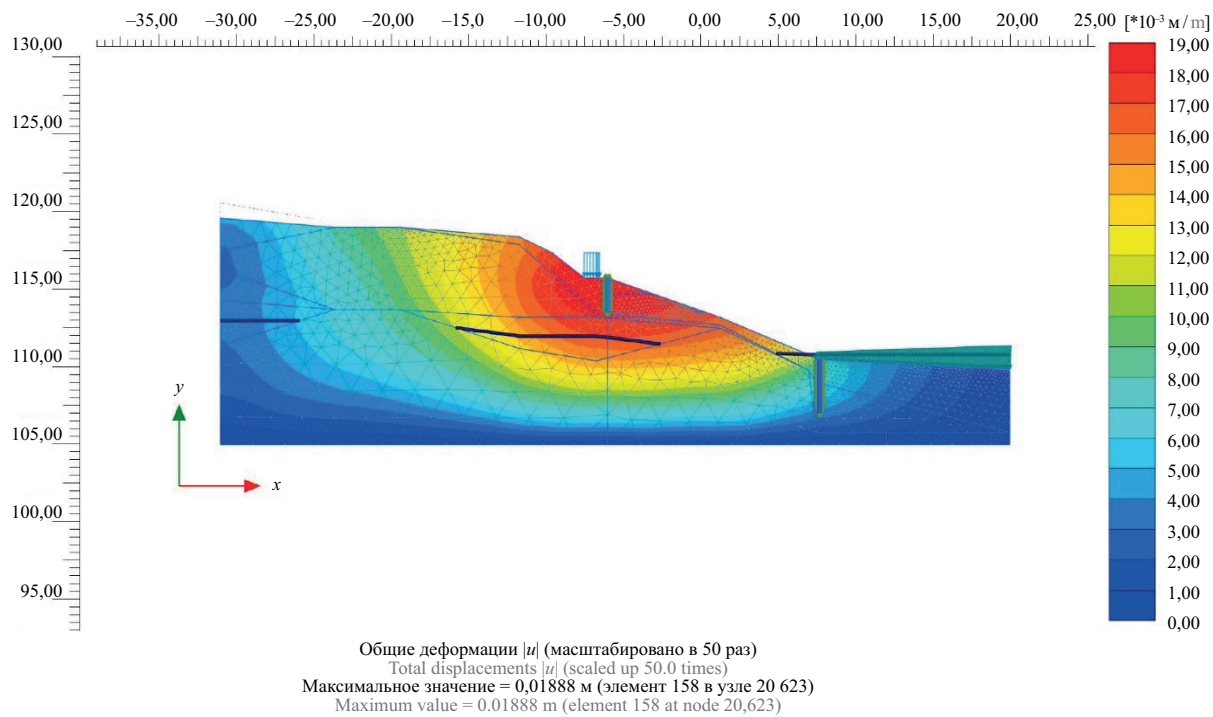


Рис. 7. Общие перемещения на стадии устройства ограждения из сборного железобетона
Fig. 7. Total displacements at the stage of installing the precast reinforced concrete retaining structure

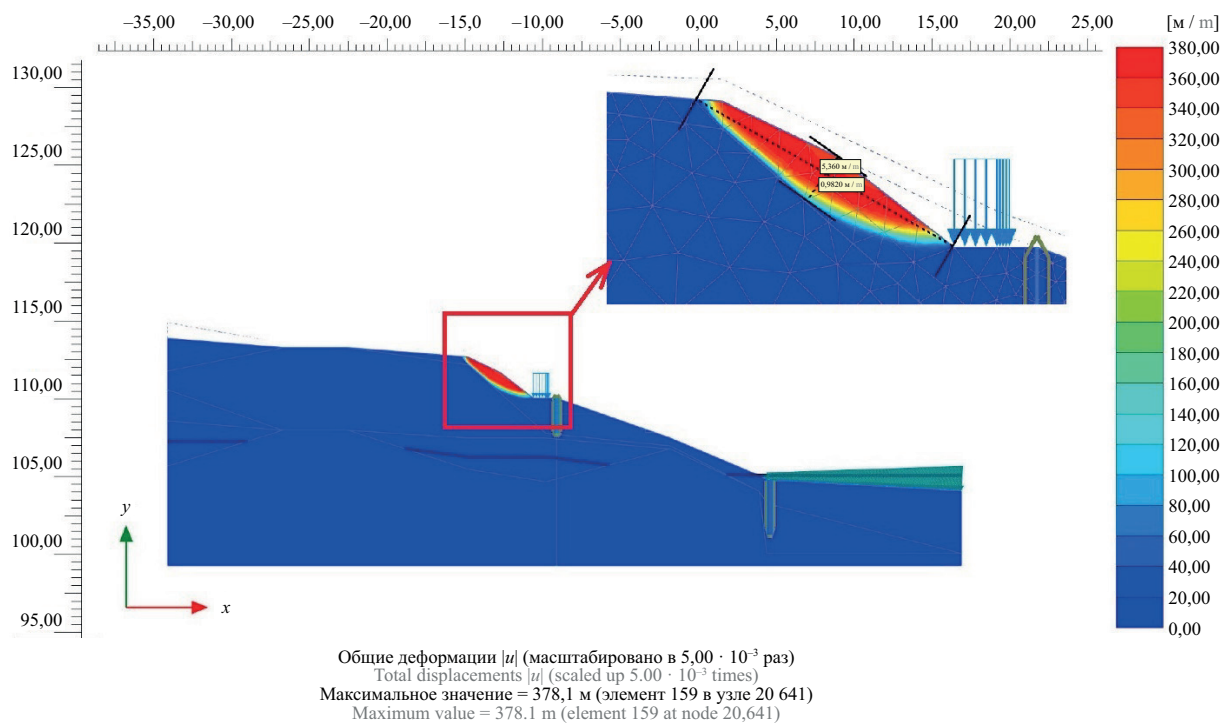


Рис. 8. Призма скольжения на этапе устройстве ограждения из сборного железобетона
Fig. 8. Sliding prism at the stage of installing the precast reinforced concrete retaining structure

Информация о шаге / Step info				
Фаза / Phase	Уст нагр [Phase_8] / Stab loading (фаза_8)			
Шаг / Step	Начальный / Initial			
Режим расчета / Calulation mode	Классический режим / Classical mode			
Тип шага / Step type	Безопасность / Safety			
Обновленная сетка Updated mesh	Нет / False			
Тип решателя / Solver type	Пикос / Picos			
Тип ядра / Kernel type	64 бит / 64 bit			
Коэффициент экстраполяции Extrapolation factor	2,000			
Относительная жесткость Relative stiffness	−0,08563E ^{−9}			
Множители / Multipliers				
Вес грунта / Soil weight			$\sum M_{Weight}$	1,000
Коэффициент снижения прочности Strength reduction factor	M_{sf}	−0,08985E ^{−3}	$\sum M_{sf}$	1,439
Время / Time	Приращение Increment	0,000	Конечное время End time	0,000
Позтапное строительство / Staged construction				
Активная доля общей площади Active proportion total area	M_{Area}	0,000	$\sum M_{Area}$	0,9694
Активная доля этапа Active proportion of stage	M_{Stage}	0,000	$\sum M_{Stage}$	0,000
Силы / Forces				
F_x	0,000 кН/м / kN/m			
F_y	0,000 кН/м / kN/m			
Консолидация / Consolidation				
Реализованное избыточное давление, макс Realised $P_{Excess,Max}$	0,000 кН/м ² / kN/m ²			

Рис. 9. Информация о расчетном этапе на фазе устройства ограждения из сборного железобетона ($k_{\text{уст}}$)
Fig. 9. Information about the calculation phase at the stage of installing the precast reinforced concrete retaining structure (k_{sf})

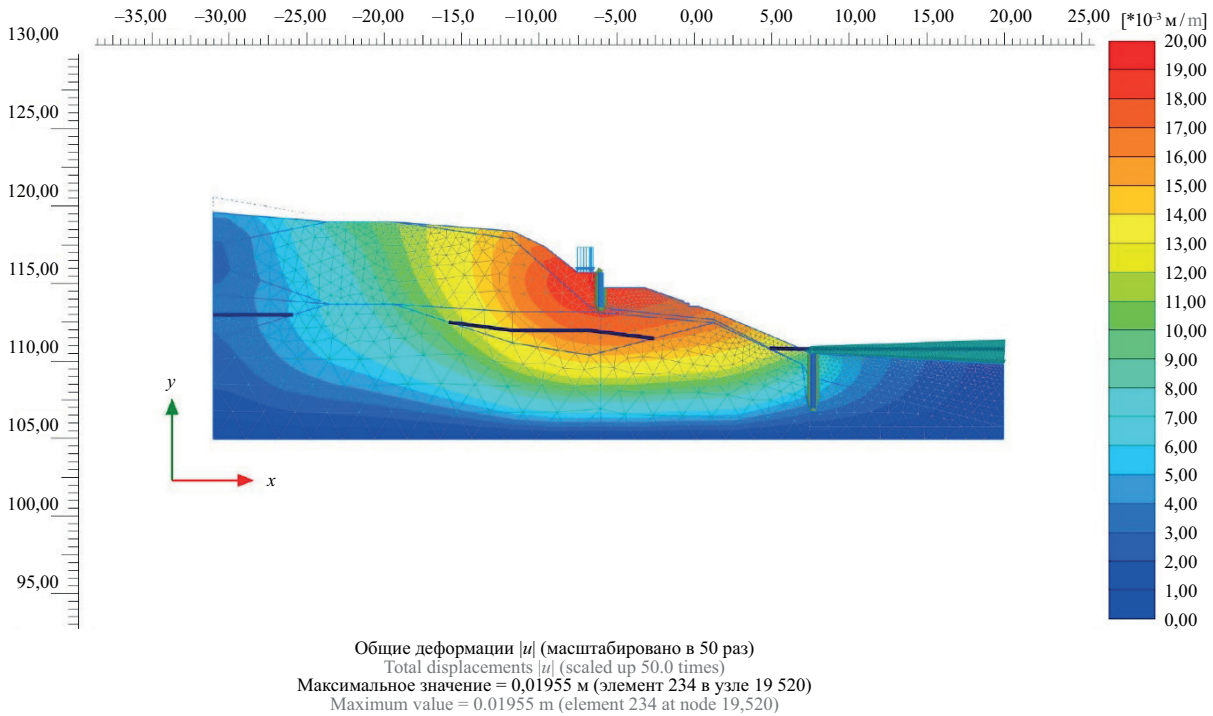


Рис. 10. Общие перемещения на стадии разработки грунта для устройства лестницы
Fig. 10. Total displacements during excavation for stair construction

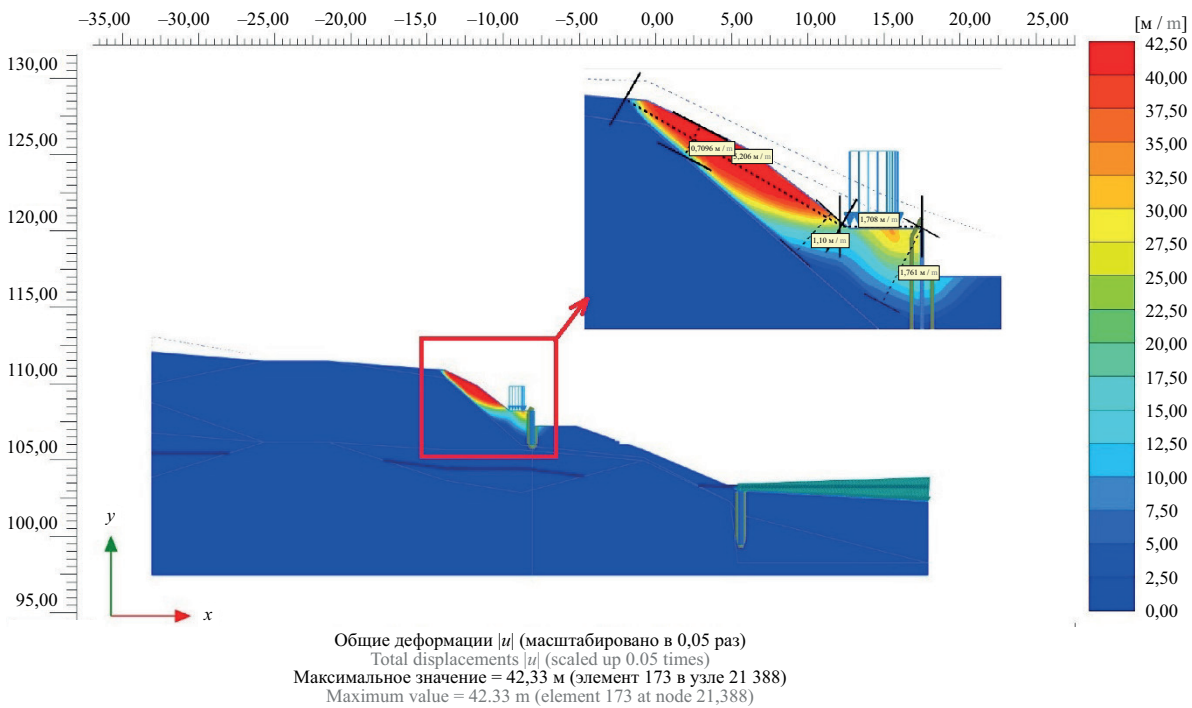


Рис. 11. Призма скольжения на фазе разработки грунта для устройства лестницы
Fig. 11. Sliding prism during excavation for stair construction

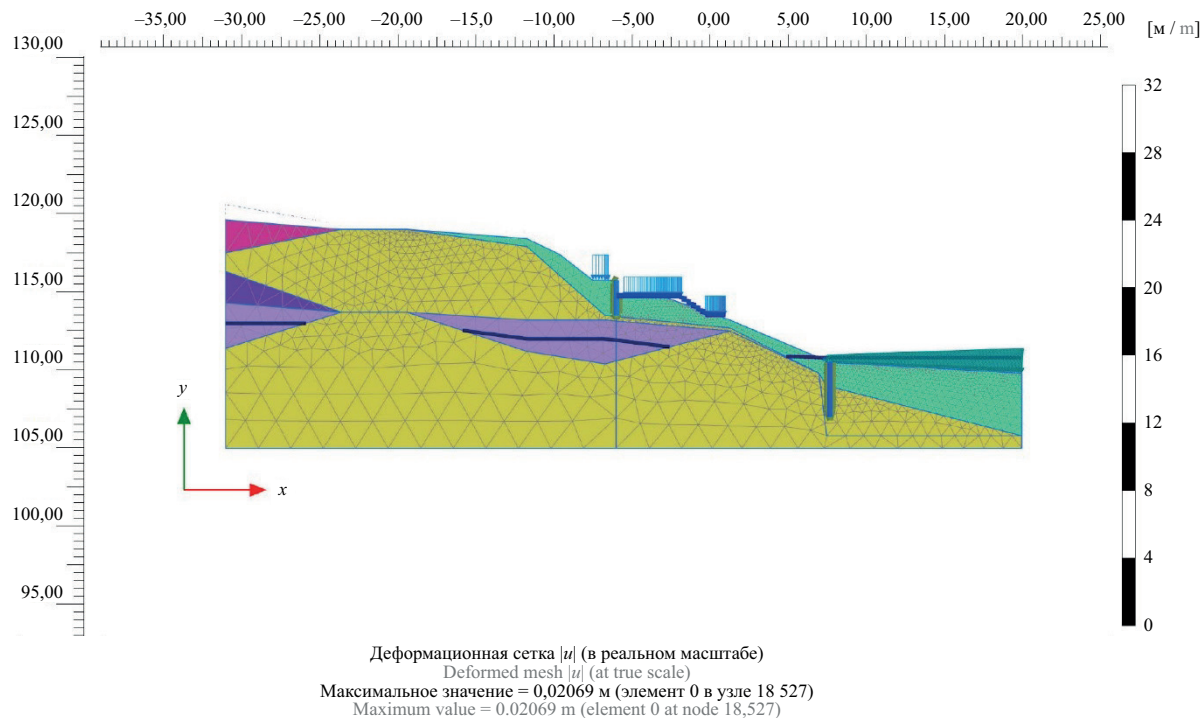


Рис. 12. Деформированная сетка эксплуатационной стадии

Fig. 12. Deformed mesh at the stage of operation

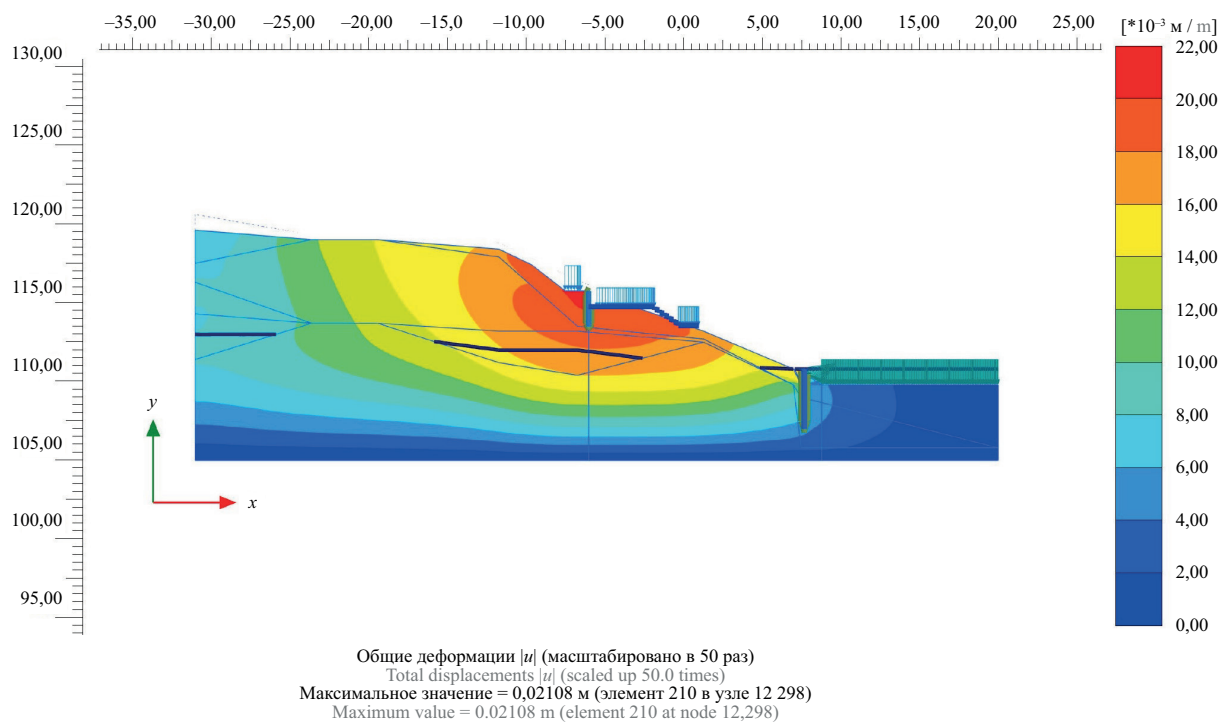


Рис. 13. Общие деформации на стадии эксплуатации

Fig. 13. Total displacements at the stage of operation

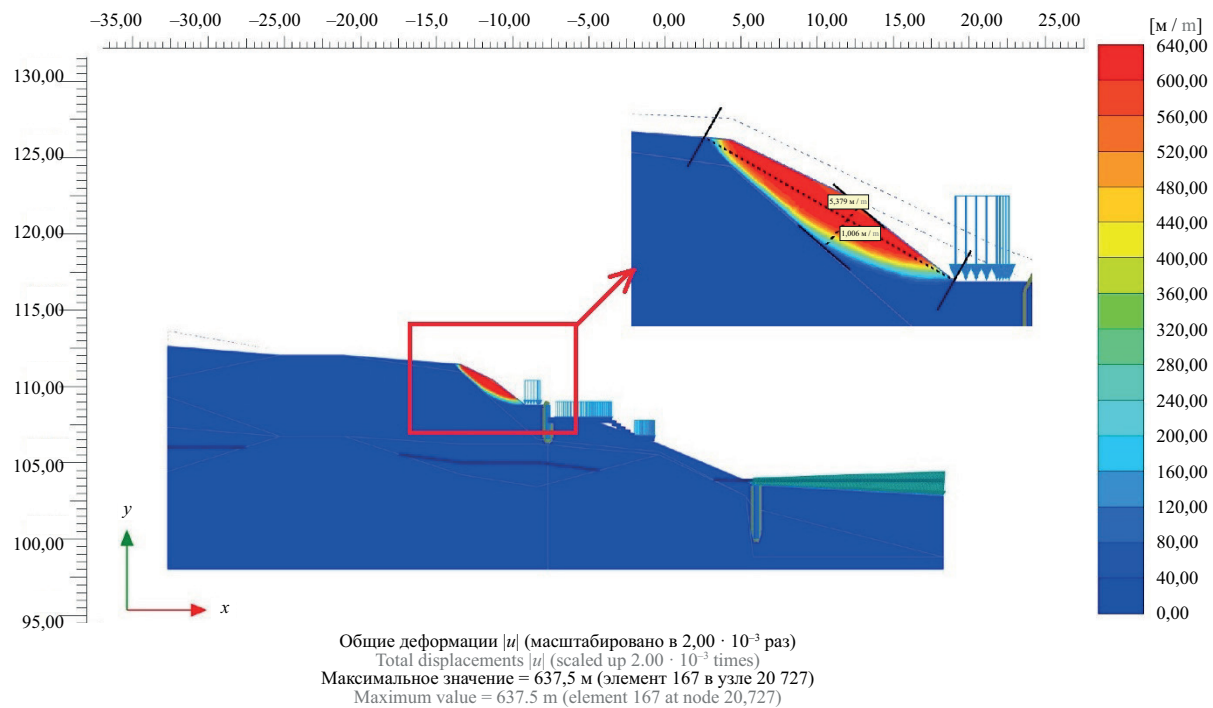


Рис. 14. Призма скольжения на эксплуатационной фазе

Fig. 14. Sliding prism at the stage of operation

Табл. 2. Результаты расчетов коэффициентов устойчивости на различных стадиях расчета

Table 2. Results of stability factor calculations at various stages of analysis

Номер стадии Stage number	Наименование / Stage name	$k_{уст}$ факт k_{sf} actual	$k_{уст}$ треб k_{sf} required
2	Срезка ИГЭ-1 EGU-1 shear stage	1,85	1,2
3	Ограждающая конструкция из бревен лиственницы Retaining structure made of larch logs	1,84	
4	Стена в грунте в зоне расположения пешеходных платформ и дорожек Diaphragm wall near pedestrian platforms and pathways	1,44	
5	Разработка грунта для устройства пешеходных платформ Excavation for construction of pedestrian platforms	1,47	
6	Возведение пешеходных платформ и лестниц Construction of pedestrian platforms and stairs	1,44	
7	Эксплуатационная стадия Operation stage	1,44	

ки устойчивости склона на 4-й стадии представлены на рис. 9.

5. Разработка грунта для устройства пешеходных платформ и проверка устойчивости системы «грунтовой массив – сооружение».

На рис. 10 показаны изополя общих деформаций массива грунта на этапе завершения разработки грунта для устройства пешеходных платформ.

Вид формирующейся призмы обрушения на данном этапе расчета представлен на рис. 11.

6. Возведение пешеходных платформ и лестниц.

7. Приложение эксплуатационной нагрузки на пешеходные платформы величиной 15 кН/пог. м.

На рис. 12, 13 приведены результаты расчетов общих деформаций на завершающем этапе производства работ.

Призма обрушения, полученная по результатам численного моделирования на этапе завершения работ по проектируемому объекту, показана на рис. 14.

Анализируя полученные результаты на каждой стадии расчета, можно сделать вывод о том, что принятые решения являются эффективными в рассматриваемых условиях проектируемого благоустройства. Критерий устойчивости склона на всех этапах осуществления работ не ниже предельного значения

1,2⁴, т.е. выполняется условие: $k_{уст}^{факт} > k_{уст}^{треб}$. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования приняты следующие защитные мероприятия:

- планировка поверхности;

⁴ СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения : введ. 01.01.2013. М., 2012.

- возведение ограждающей конструкции вдоль береговой линии из бревен лиственницы;
- засыпка пространства между ограждающей конструкцией и существующей поверхностью склона щебнем, песком и булыжниками;
- устройство подпорных стен выше прогнозируемого уровня воды в виде сборной стены в грунте, устойчивость которой обеспечивается заделкой в грунт.

Принятые защитные мероприятия обеспечивают штатную эксплуатацию проектируемых конструкций и сооружений в сложившихся условиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гинзбург Л.К. Рекомендации по выбору методов расчета коэффициента устойчивости склона и оползневого давления. М. : Центральное бюро научно-технической информации, 1986. 123 с.
2. Симонян В.В. Определение главных осей движения оползня по эллипсу смещений // Актуальные проблемы землепользования, землеустройства и кадастров : сб. ст. Всеросс. школы молодых ученых. 2006. С. 334–344. EDN SAQAWX.
3. Хвостова О.Е. Оценка запаса устойчивости склонов береговой линии Горьковского водохранилища // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. № 4 (83). С. 50–61. EDN NUXQYX.
4. Farres P.J. The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability // Catena. 1987. Vol. 14. Issue 1–3. Pp. 119–130. DOI: 10.1016/s0341-8162(87)80009-7
5. Poesen J. Field measurements of splash erosion to validate a splash transport model // Zeitschrift für Geomorphologie. 1986. Vol. 58. Pp. 81–91.
6. Кондрашова В.А., Мельникова Е.С., Черднichenko Т.Ф. Повышение надежности капитального ремонта защитных сооружений причальной набережной реки Волги, расположенной в Ворошиловском районе г. Волгограда // Экономика строительства. 2025. № 6. С. 592–595. EDN APUPLH.
7. Пендин В.В., Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. М. : ЛЕНАНД, 2015. 320 с.
8. Albataineh N. Slope stability analysis using 2D and 3D methods. Akron : The University of Akron, 2006.
9. Bishop A.W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes // Géotechnique. 1955. Vol. 5. Issue 1. Pp. 7–17. DOI: 10.1680/geot.1955.5.1.7
10. Gitirana G.Jr. Weather-related Geo-hazard Assessment Model for Railway Embankment Stability : PhD Thesis. Saskatoon : University of Saskatchewan, 2005.
11. Janbu N. Application of composite slip surface for stability analysis // Proceedings of European Conference on Stability of Earth Slopes. 1954. Pp. 43–49.
12. Morgenstern N.R., Price V.E. The analysis of the stability of general slip surfaces // Géotechnique. 1965. Vol. 15. Issue 1. Pp. 79–93. DOI: 10.1680/geot.1965.15.1.79
13. Калинин Э.В., Панасьян Л.Л., Тимофеев Е.М. Новый подход к расчету устойчивости оползневых склонов // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2008. № 1. С. 21–29. EDN JVAQBR.
14. Сироткина О.Н., Тарабукин В.В., Фоменко И.К., Шубина Д.Д. Сравнительный анализ методов расчета устойчивости склона в объемной постановке задачи // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 9–1 (99). С. 55–62. DOI: 10.23670/IRJ.2020.99.9.011. EDN OJPPWS.
15. Фоменко И.К. Общая классификационная схема методов расчета устойчивости склонов // Научные труды SWorld. 2012. Т. 35. № 3. С. 75–80. EDN PDHMBV.
16. Фоменко И.К. Современные тенденции в расчетах устойчивости склонов // Инженерная геология. 2012. № 6. С. 44–53. EDN PLSVTP.
17. Фоменко И.К., Зеркаль О.В. Преимущества методов оценки устойчивости склонов в трехмерной постановке // Геотехника. 2011. № 5. С. 38–41. EDN OWGMSH.
18. Фоменко И.К., Зеркаль О.В., Горбцов Д.Н. Современные средства в количественной оценке устойчивости склонов // Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения : мат. науч.-практ. конф. 2017. С. 94–101. EDN ZROHVF.
19. Gitirana G.Jr., Santos M.A., Fredlund M.D. Three-dimensional analysis of the Lodalen landslide // GeoCongress 2008. 2008. Pp. 186–190. DOI: 10.1061/40971(310)23
20. Васильев С.А. Математическая модель для прогноза эрозионных процессов на склоновых агроландшафтах // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 9 (184). С. 96–100. EDN VHLKCD.
21. Копытов Д.Ю., Овчинникова С.В., Коженко Н.В. Интегрированное применение методов расчета устойчивости оползневых склонов // Инженерный вестник Дона. 2024. № 8 (116). С. 514–520. EDN PRUZEC.

22. Прокопов А.Ю., Адоньев Н.А. Обзор зарубежного опыта инженерной защиты морских берегов и склонов // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. 2024. Т. 3. № 1. С. 27–47. DOI: 10.23947/2949-1835-2024-3-1-27-47. EDN ZBEPOK.

23. Сироткина О.Н., Фоменко И.К., Горобцов Д.Н. О классификации математических методов оценки локальной оползневой опасности // Наука России: цели и задачи : сб. науч. тр. по мат. II Междунар. науч. конф. 2017. С. 50–55. DOI: 10.18411/sr-10-04-2017-2-13. EDN YQALPN.

24. Bauer B. Soil splash as an important agent of erosion // *Geographia Polonica*. 1990. Vol. 58. Pp. 99–106.

25. Cruden D.M., Varnes D.J. Landslide types and processes // *Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247*. Washington, DC : Transportation Research Board, 1996. Pp. 36–75.

26. Highland L.M., Bobrowsky P. The landslide handbook — A guide to understanding landslides // Circular. 2008. 129 p. DOI: 10.3133/cir1325

27. Зотов Д.И. Особенности развития оползневого процесса на территории Нижегородской области // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. 2014. № 4 (13). С. 55–59. EDN TKOKNN.

28. Соколов Н.С. Практика усиления нагруженного склона // Строительные материалы. 2019. № 1–2. С. 70–78. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-70-78. EDN VVEYPO.

29. Харичкин А.И., Соловьев Д.Ю., Афанасьев Н.А., Журавлев Р.Р. Геотехнические аспекты инженерной защиты территории Нижнего Новгорода на примере объекта «Фуникулер на откосе Нижегородского кремля» // *Construction and Geotechnics*. 2024. Т. 15. № 4. С. 25–35. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.4.03. EDN IYZSAE.

Поступила в редакцию 21 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 28 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 28 февраля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Роман Николаевич Никоноров — преподаватель кафедры механики грунтов и геотехники, магистр; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; главный инженер; Научно-инженерный центр Тоннельной ассоциации (НИЦ Тоннельной ассоциации); 129344, г. Москва, ул. Енисейская, д. 7, стр. 4, ком. 10; SPIN-код: 7569-0706, ORCID: 0000-0002-0807-3787; nikonorov.rn@nizta.ru;

Ульяна Олеговна Московкина — студент; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; moskovkina.u@mail.ru;

Екатерина Алексеевна Софронова — студент; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; soka280204@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ginzburg L.K. *Recommendations on the selection of methods for calculating slope stability coefficient and landslide pressure*. Moscow, Central Bureau of Scientific and Technical Information, 1986; 123. (rus.).

2. Simonyan V.V. Determination of the main axes of landslide movement using displacement ellipse. *Actual problems of land use, land management and cadastres : collection of articles of the All-Russian school of young scientists*. 2006; 334–344. EDN SAQAWX. (rus.).

3. Khvostova O.E. Slope stability assessment of Gorkovskoe reservoir shoreline. *Proceedings of R.E. Alekseev NSTU*. 2010; 4(83):50–61. EDN NUXQYX. (rus.).

4. Farres P.J. The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability. *Catena*. 1987; 14(1–3): 119–130. DOI: 10.1016/s0341-8162(87)80009-7

5. Poesen J. Field measurements of splash erosion to validate a splash transport model. *Zeitschrift für Geomorphologie*. 1986; 58:81–91.

6. Kondrashova V.A., Melnikova E.S., Cherednichenko T.F. Improving the reliability of major repairs of protective structures of the Volga river berth embankment located in the Voroshilovsky district of Volgograd. *Construction Economics*. 2025; 6:592–595. EDN APULPH. (rus.).

7. Pendin V.V., Fomenko I.K. *Methodology for assessment and prediction of landslide hazard*. Moscow, LENAND, 2015; 320. (rus.).

8. Albataineh N. *Slope stability analysis using 2D and 3D methods*. Akron, The University of Akron, 2006.

9. Bishop A.W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Géotechnique*. 1955; 5(1):7–17. DOI: 10.1680/geot.1955.5.1.7

10. Gitirana G.Jr. *Weather-related Geo-hazard Assessment Model for Railway Embankment Stability* : PhD Thesis. Saskatoon, University of Saskatchewan, 2005.
11. Janbu N. Application of composite slip surface for stability analysis. *Proceedings of European Conference on Stability of Earth Slopes*. 1954; 43-49.
12. Morgenstern N.R., Price V.E. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*. 1965; 15(1):79-93. DOI: 10.1680/geot.1965.15.1.79
13. Kalinin E.V., Panas'yan L. L., Timofeev E.M. A new approach to landslide slope stability analysis. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2008; 1:21-29. EDN JVAQBR. (rus.).
14. Sirotkina O.N., Tarabukin V.V., Fomenko I.K., Shubina D.D. Comparative analysis of methods for calculating slope stability under 3D problem statement. *International Research Journal*. 2020; 9-1(99):55-62. DOI: 10.23670/IRJ.2020.99.9.011. EDN OJPPWS. (rus.).
15. Fomenko I.K. General classification scheme of slope stability calculation methods. *Scientific works SWorld*. 2012; 35(3):75-80. EDN PDHMBV. (rus.).
16. Fomenko I.K. Current trends in slope stability calculations. *Engineering Geology World*. 2012; 6:44-53. EDN PLSVTP. (rus.).
17. Fomenko I.K., Zerkal O.V. Advantages of three-dimensional methods of assessing slope stability. *Geotechnics*. 2011; 5:38-41. EDN OWGMSH. (rus.).
18. Fomenko I.K., Zerkal O.V., Gorobtsov D.N. Modern tools for quantitative assessment of slope stability. *Engineering and geological problems of our time and methods for their solution : proceedings of the scientific and practical conference*. 2017; 94-101. EDN ZROHVF. (rus.).
19. Gitirana G.Jr., Santos M.A., Fredlund M.D. Three-dimensional analysis of the Lodalen landslide. *GeoCongress 2008*. 2008; 186-190. DOI: 10.1061/40971(310)23
20. Vasiliev S.A. A mathematical model to predict erosion on sloping agrolandscape. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2015; 9(184):96-100. EDN VHLKCD. (rus.).
21. Kopytov D.Y., Ovchinnikova S.V., Kozhenko N.V. Integrated application of methods for calculating the stability of landslide slopes. *Engineering journal of Don*. 2024; 8(116):514-520. EDN PRUZEC. (rus.).
22. Prokopov A.Yu., Adoniev N.A. Foreign experience review on engineering protection of seashores and hillslopes. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024; 3(1):27-47. DOI: 10.23947/2949-1835-2024-3-1-27-47. EDN ZBEPOK. (rus.).
23. Sirotkina O.N., Fomenko I.K., Gorobtsov D.N. On the classification of mathematical methods for assessing local landslide hazard. *Science of Russia: goals and objectives : collection of scientific papers based on the materials of the II international scientific conference*. 2017; 50-55. DOI: 10.18411/sr-10-04-2017-2-13. EDN YQALPN. (rus.).
24. Bauer B. Soil splash as an important agent of erosion. *Geographia Polonica*. 1990; 58:99-106.
25. Cruden D.M., Varnes D.J. Landslide types and processes. *Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247*. Washington, DC, Transportation Research Board, 1996; 36-75.
26. Highland L.M., Bobrowsky P. The landslide handbook — A guide to understanding landslides. *Circular*. 2008; 129. DOI: 10.3133/cir1325
27. Zotov D.I. Features of landslide process development in Nizhny Novgorod region. *Bulletin of the Voronezh Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2014; 4(13):55-59. EDN TKOKNN. (rus.).
28. Sokolov N.S. Practice of strengthening the loaded slope. *Construction Materials*. 2019; 1-2:70-78. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-70-78. EDN VVEYPO. (rus.).
29. Kharichkin A.I., Soloviev D.Yu., Afanasev N.A., Zhuravlev R.R. Geotechnical aspects of civil protection engineering of Nizhny Novgorod at the facility “funicular on the slope of the Nizhny Novgorod kremlin”. *Construction and Geotechnics*. 2024; 15(4):25-35. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.4.03. EDN IYZSAE. (rus.).

Received December 21, 2025.

Adopted in revised form on February 28, 2026.

Approved for publication on February 28, 2026.

B I O N O T E S : **Roman N. Nikonorov** — lecturer of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics, master's degree; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; chief Engineer; **Scientific and Engineering Center of the Tunnel Association**; 10, build. 4, 7 Eniseyskaya st., Moscow, 4129344, Russian Federation; SPIN-code: 7569-0706, ORCID: 0000-0002-0807-3787; nikonorov.rn@nizta.ru;

Ulyana O. Moskovkina — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; moskovkina.u@mail.ru;

Ekaterina A. Sofronova — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; soka280204@gmail.com.

Contribution of the authors: all authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Методика учета влияния вдавливания призматических железобетонных свай на напряженно-деформированное состояние грунтового основания

Рашид Абдуллович Мангушев, Михаил Сергеевич Дружинин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Погружение заводских железобетонных свай методом статического вдавливания принято считать щадящей технологией, однако при массовом устройстве в водонасыщенных глинистых грунтах наблюдается значительный подъем как окружающего грунтового массива, так и зданий существующей застройки. Представлена инженерная методика, с помощью которой можно предварительно оценить ожидаемую зону влияния и прогнозируемую деформацию соседних сооружений.

Материалы и методы. Предлагаемый подход основан на аналитическом решении задачи консолидации грунта вокруг свай, использующем модель радиального потока поровой воды. Однородное свайное поле принимается в виде эквивалентной полости, объем которой равен объему вытесняемого грунта. Радиус зоны влияния ограничивается расстоянием, за пределами которого избыточное поровое давление равно нулю. Подъем окружающего грунтового массива предлагается осуществлять методом послойного суммирования.

Результаты. Для оценки возможности применения методики выполнено сопоставление результатов аналитического решения с данными геотехнического мониторинга. Прогнозируемые значения показали достаточную сходимость с натурными показаниями. Оценена возможность применения корреляционных зависимостей по определению недренированной прочности грунта для предлагаемого подхода.

Выводы. Разработанная методика оценки деформаций грунтового массива и зоны влияния при погружении свай вдавливания верифицирована данными натурных наблюдений в Санкт-Петербурге, что подтверждает ее пригодность для инженерных расчетов на предварительных этапах. Ключевым условием достоверности прогноза является использование параметров недренированной прочности грунта, определенных лабораторными трехосными испытаниями. Для обеспечения надежности и учета специфики сложных инженерно-геологических условий конечные рекомендации следует вырабатывать на основе численного моделирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сваи вдавливания, технологическое влияние, оценка влияния, зона влияния, подъем грунтового массива, подъем зданий окружающей застройки, избыточное поровое давление, недренированная прочность грунта

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мангушев Р.А., Дружинин М.С. Методика учета влияния вдавливания призматических железобетонных свай на напряженно-деформированное состояние грунтового основания // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 6. С. 922–930. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.922-930

Автор, ответственный за переписку: Михаил Сергеевич Дружинин, dms95@mail.ru.

Methodology for Assessing the Effect of Jacked Prismatic Reinforced Concrete Piles on the Stress–Strain State of Foundation Soils

Rashid A. Mangushev, Mikhail S. Druzhinin

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

ABSTRACT

Introduction. The installation of precast reinforced concrete piles by static jacking is generally considered a low-impact technology; however, when applied on a large scale in water-saturated clay soils, a significant heave of both the surrounding soil mass and adjacent buildings is observed. An engineering method is presented that enables a preliminary assessment of the extent of the influence zone and prediction of deformations in adjacent structures.

Materials and methods. The proposed approach is based on an analytical solution to the problem of soil consolidation around a pile; it employs a model of radial pore-water flow. A homogeneous pile field is represented as an equivalent cavity whose volume is equal to the volume of the displaced soil. The radius of the influence zone is defined as the distance beyond which the excess pore water pressure is zero. The heave of the surrounding soil mass is evaluated using a layer-by-layer summation technique.

Results. To assess the applicability of the procedure, the results of the analytical solution were compared with the geotechnical monitoring data. The predicted values demonstrated satisfactory agreement with the in-situ measurements. The applicability of empirical correlations for estimating the undrained shear strength of soil within the proposed approach was evaluated.

Conclusions. The procedure for estimating deformations of the soil mass and the influence zone during pile installation by static jacking has been verified against field observations in Saint Petersburg, and its suitability is confirmed for engineering calculations at preliminary design stages. A key condition for the reliability of the prediction is the use of undrained shear strength parameters obtained from laboratory triaxial tests. To ensure reliability and to account for complex engineering and geological conditions, final recommendations should be developed on the basis of numerical modeling.

KEYWORDS: jacked piles, construction-induced effects, influence assessment, influence zone, soil mass heave, heave of adjacent buildings, excess pore pressure, undrained shear strength of soil

FOR CITATION: Mangushev R.A., Druzhinin M.S. Methodology for Assessing the Effect of Jacked Prismatic Reinforced Concrete Piles on the Stress–Strain State of Foundation Soils. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(6):922-930. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.922-930 (rus.).

Corresponding author: Mikhail S. Druzhinin, dms95@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Технология статического вдавливания сборных железобетонных свай получила широкое применение в условиях плотной городской застройки. Ключевыми преимуществами метода являются отсутствие динамических и акустических воздействий; высокая несущая способность; исключение дефектов ствола, характерных для буровых и буронабивных свай [1–8].

Распространенность данной технологии в г. Санкт-Петербурге также обусловлена спецификой инженерно-геологических условий. Разрез представлен мощной (от 5 до 30 м) толщей водонасыщенных глинистых грунтов. Эти отложения обладают ярко выраженной тиксотропностью, низкими прочностными и деформационными характеристиками, а также значительной пространственной неоднородностью и анизотропией свойств.

Несмотря на ряд преимуществ рассматриваемого метода, натурные наблюдения выявили существенный недостаток. При массовом погружении свай без использования специальных компенсирующих мероприятий фиксируется подъем массива грунта и, как следствие, фундаментов прилегающих сооружений [9–12].

Согласно основной рабочей гипотезе, негативный эффект обусловлен в первую очередь генерацией избыточного порового давления в процессе погружения свай в водонасыщенные слабофильтрующие глинистые грунты [9, 13–18]. В результате развивается двухстадийный процесс деформирования грунтового массива. На первой, кратковременной стадии, давление передается поровой жидкости, что проявляется в выпоре и подъеме грунта на значительное расстояние. На второй, длительной стадии, развивается фильтрационная консолидация [19, 20]: отжатие воды и передача напряжений скелету грунта инициируют его уплотнение и обратную деформацию — осадку. Этот затухающий процесс, длящийся годами, сопровождается разрушением структурных связей, а итоговая осадка может превзойти начальный подъем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методика расчета

Ввиду сказанного можно предположить, что зона влияния от погружения свай вдавливания ограничивается областью, на границе которой избыточное поровое давление не возникает.

В работе М. Рэндольф и Ч. Рот [21] представлено аналитическое решение для задачи консолидации грунта вокруг забивной сваи, основанное на модели радиального потока поровой воды. Получено выражение для начального распределения избыточного порового давления, которое формируется вследствие расширения цилиндрической полости в идеализированном упругопластическом материале:

$$u_{\text{excess}} = \begin{cases} 2 \cdot c_u \cdot \ln \frac{R}{r}; & r_0 \leq r \leq R, \\ 0; & R < r \end{cases}, \quad (1)$$

где c_u — недренированная прочность грунта; r_0 — радиус сваи; r — рассматриваемое расстояние; R — радиус области пластического деформирования грунта, за пределами которой избыточное поровое давление не образуется и определяется по формуле:

$$R = \sqrt{\frac{G}{c_u}} \cdot r_0, \quad (2)$$

где G — модуль сдвига грунта.

Из анализа выражений (1) и (2) следует, что R является искомым радиусом зоны влияния. Однако в текущей постановке это справедливо только для одиночной сваи вдавливания.

Очевидно, что при устройстве свайного поля пластические зоны отдельных свай перекрываются, а избыточные поровые давления суммируются. В связи с чем область изменения напряженно-деформированного состояния грунта вокруг группы свай существенно больше, чем вокруг одиночной.

Для учета этого обстоятельства предлагается однородное свайное поле представить в виде «эквивалентной полости», объем которой равен объему

вытесняемого грунта. Размер этой области можно установить по следующему выражению:

$$R_{з.п} = \sqrt{\frac{V_{\text{выт}}}{\pi \cdot H}}, \quad (3)$$

где $V_{\text{выт}}$ — объем вытесняемого грунта; H — глубина погружения свай.

Выражение (3) позволяет учитывать предварительное лидерное бурение, которое применяется в качестве превентивной меры для уменьшения подъема окружающего грунтового массива.

Таким образом, радиус зоны влияния от погружения группы свай вдавливания можно определить так:

$$R_{з.в} = \sqrt{\frac{G}{c_u}} \cdot R_{з.п}. \quad (4)$$

В отечественной практике инженерно-геологических изысканий параметр недренированной прочности грунта c_u , получаемый по результатам трехосных испытаний, выявляется достаточно редко. Отсутствие в составе исходных данных рассматриваемого показателя заметно ограничивает возможность использования выражения (4). Вместе с тем имеется ряд зависимостей для водонасыщенных глинистых грунтов Санкт-Петербурга, по которым можно оценить недренированную прочность, имея стандартные характеристики, полученные по результатам изысканий.

К их числу относятся корреляции, установленные в работе М.А. Лучкина [22], связывающие сопротивление недренированному сдвигу с данными статического зондирования (5) и показателями природной влажности грунта (6):

$$c_u = q_c / 19; \quad (5)$$

$$c_u = 1,6373 \cdot e^{-0,122w} \text{ МПа}, \quad (6)$$

где q_c — лобовое сопротивление конуса зонда; w — природная влажность грунта, %.

В работах [23, 24] предложена следующая формула для вычисления недренированной прочности:

$$c_u = \frac{\sigma'_0 \left(1 - (\alpha - 1) \cdot \frac{1 - K_0}{1 + K_0} \right) \cdot \sin(\varphi') + c' \cdot \cos(\varphi')}{1 + (\alpha - 1) \cdot \sin(\varphi')}, \quad (7)$$

где σ'_0 — природные средние эффективные напряжения в грунте; α — коэффициент, учитывающий особенности образования избыточных поровых давлений при девиаторном нагружении; K_0 — коэффициент бокового давления грунта; φ' и c' — эффективные угол внутреннего трения и сцепления грунта.

По результатам натурных исследований [18, 19, 25] при внедрении свай с вытеснением грунта рост избыточных поровых давлений происходит практически мгновенно. В соответствии с принципом эффективных напряжений К. Терцаги при неизменных полных

напряжениях это приводит к эквивалентному снижению эффективных напряжений в скелете грунта:

$$\sigma' = -u_{\text{excess}}. \quad (8)$$

Возникающая таким образом разгрузка грунтового массива вызывает его упругую деформацию, характеризующуюся модулем повторного нагружения E_{ur} .

Расчетную оценку подъема основания s_{lif} предлагается осуществлять известным методом послойного суммирования в соответствии с СП 22.13330.2016, где в качестве меры изменения напряженного состояния принято избыточное поровое давление:

$$s_{\text{lif}} = \beta \sum_{i=1}^n \frac{u_{\text{excess},i} \cdot h_i}{E_{ur,i}}. \quad (9)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки применимости полученных выражений (4) и (9), определяющих зону влияния и подъем грунтового основания при массовом погружении свай, выполнено сопоставление результатов расчета с данными геотехнического мониторинга.

Строительная площадка расположена в центральном районе г. Санкт-Петербурга вблизи зданий окружающей застройки с ленточными фундаментами на естественном основании.

Погружение железобетонных составных призматических свай в количестве 527 штук сечением $0,35 \times 0,35$ м на глубину 24 м осуществлялось методом статического вдавливания. Работы производились после устройства замкнутого контура ограждения котлована длиной 16 м. Принятая технология предусматривала последовательное перемещение сваевдавливающей установки от границ к центру пятна застройки. Мероприятия по предварительному рыхлению грунта или лидерному бурению не проводились.

Инженерно-геологические условия характерны для рассматриваемого района строительства и представлены в табл. 1. Уровень грунтовых вод зафиксирован на глубинах 2,0–3,0 м от дневной поверхности.

По результатам геотехнического мониторинга подъем окружающей застройки зафиксирован на величину до 17 мм. Зона влияния распространяется на расстояние до 44,8 м, что в 1,87 раз больше глубины погружения свай. Область наблюдения ограничена геодезическими марками, поэтому фактический размер радиуса воздействия может быть больше.

Приняты следующие расчетные допущения:

1. Избыточное поровое давление возникает только в слабофильтрующих водонасыщенных глинистых грунтах. В песчаных и насыпных грунтах оно равно нулю.

2. В случае устройства ограждения котлована оно ограничивает возможность возникновения избыточного порового давления с внешней стороны и до своей нижней отметки, но не исключает его

Табл. 1. Инженерно-геологические условия площадки строительства

Table 1. Engineering-Geological Conditions of the Construction Site

Номер ИГЭ Soil Layer No.	Наименование грунта Soil Type	Мощность слоя H , м Layer Thickness H , m	γ , кН/м ³ / kN/m ³	W , %	IL	ϕ , град. / degree	c , кПа / kPa	E , МПа / MPa	E_{ur} , МПа / MPa	G , МПа / MPa	q_c , кПа / kPa	K_0
1	Насыпные грунты Fill ground	2,5	–									
2	Пески пылеватые рыхлые, насыщенные водой Saturated loose silty sand	0,7	18,7	32	–	24	7	9	–	3,5	1835,6	0,5933
3	Пески мелкие средней плотности, насыщенные водой Saturated medium density fine sand	3,2	19,4	26	–	36	5	22	–	8,5	6550,0	0,4122
4	Суглинки легкие пылеватые текучепластичные Soft to firm sandy silty clay	5,3	19,1	29	0,93	10	10	7	12,2	2,6	945,4	0,8264
5	Суглинки тяжелые пылеватые текучие ленточные Very soft, varved (laminated) fat silty clay	4,8	18,0	40	1	7	8	6	13,2	2,2	836,2	0,8781
6	Суглинки легкие пылеватые текучепластичные слоистые Soft laminated lean silty clay	2,2	19,0	30	0,88	10	11	8	16,5	2,9	1240,0	0,8264
7	Суглинки легкие пылеватые тугопластичные Stiff lean silty clay	5,6	20,3	22	0,32	27	33	18	35,2	6,6	2480,0	0,5460
8	Супеси пылеватые пластичные Sandy silt, plastic/plastic silty sand	3,0	21,4	16	0,12	30	44	24	54,1	8,9	4827,1	0,5000
9	Глины пылеватые твердые Very stiff silty clay	5,3	20,8	20	–0,31	24	93	25	60,6	10,0	5680,0	0,5933
10	Глины пылеватые твердые Very stiff silty clay	7,4	21,4	16	–0,57	25	127	31	79,4	12,4	–	0,5774

Табл. 2. Результаты расчета по определению радиуса влияния и подъема грунтового массива

Table 2. Calculation results for determining the radius of influence and the rise of the soil mass

Номер ИГЭ Soil Layer No	Отметка подошвы, м Base Layer Elevation, m	В соответствии с выражением (5) According to (5)				В соответствии с выражением (6) According to (6)				В соответствии с выражением (7) According to (7)			
		c_{cr} , кПа / kPa	$R_{3,ab} / R_{z,3}$, м / m	u_w , кПа / kPa	s , мм ($r = 29,5$ м) mm ($r = 29,5$ m)	c_{cr} , кПа / kPa	$R_{3,ab} / R_{z,3}$, м / m	u_w , кПа / kPa	s , мм ($r = 29,5$ м) mm ($r = 29,5$ m)	c_{cr} , кПа / kPa	$R_{3,ab} / R_{z,3}$, м / m	u_w , кПа / kPa	s , мм ($r = 29,5$ м) mm ($r = 29,5$ m)
1	2,5	–	–	–	+6,1	–	–	–	+9,7	–	–	–	+13,2
2	3,2	–	–	–		–	–	–		–	–	–	
3	6,4	–	–	–		–	–	–		–	–	–	
4	11,7	49,8	–	5,6		47,6	–	5,6		20,0	–	11,4	
5	16,5	44,0	32,0	8,6		12,4	60,1	18,1		24,4	43,0	19,2	
6	18,7	65,3	30,3	5,8		42,1	37,7	22,2		33,9	42,1	25,2	
7	24,3	130,5	32,2	27,0		111,8	34,7	40,4		95,4	37,6	49,6	
8	27,3	–	–	–		–	–	–		–	–	–	
9	32,6	–	–	–		–	–	–		–	–	–	
10	40	–	–	–		–	–	–		–	–	–	

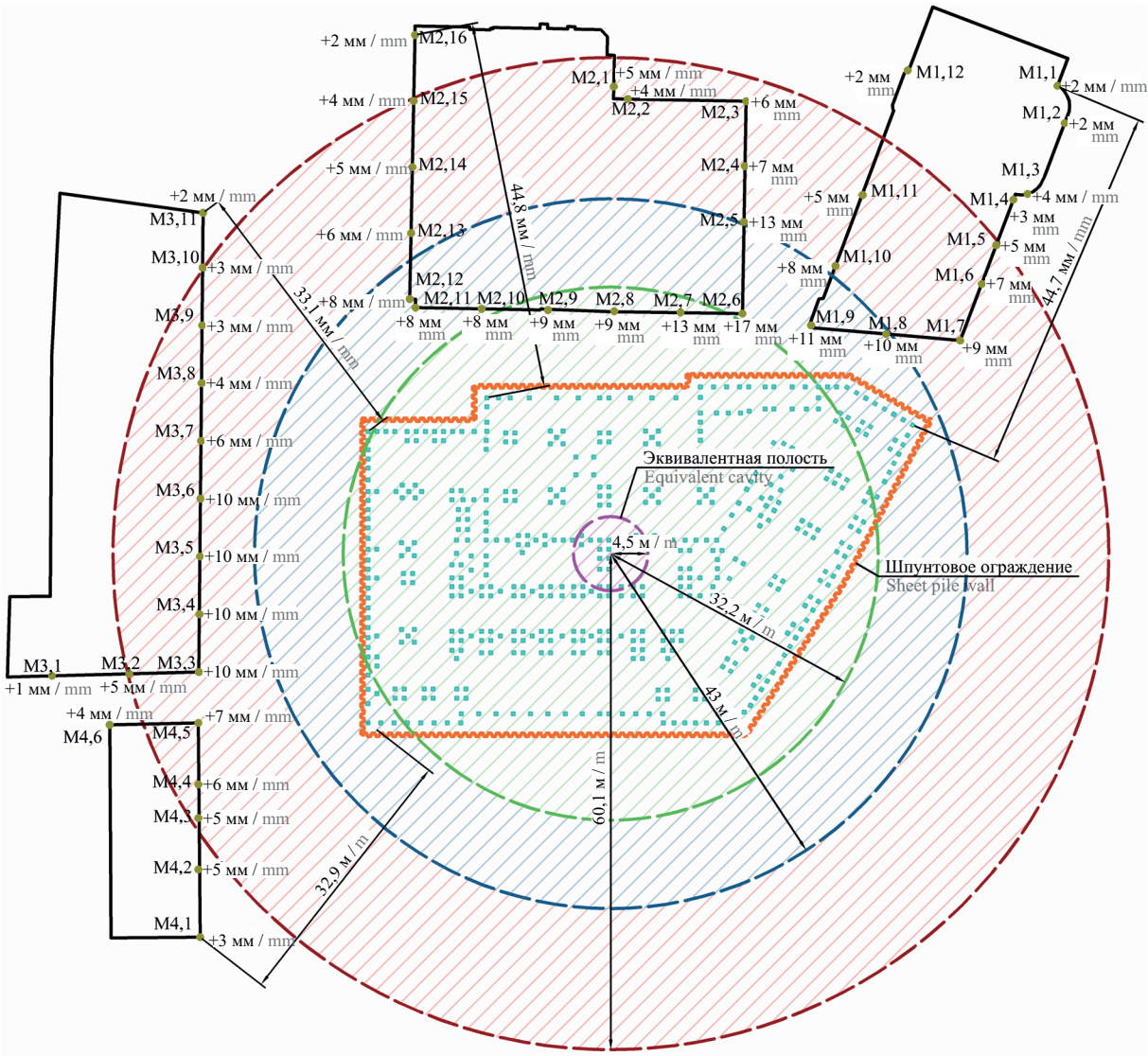


Рис. 1. Ситуационный план с результатами геотехнического мониторинга и расчетными зонами влияния: зеленым цветом отмечены расчеты с учетом зависимости (5); синим цветом — расчеты с учетом зависимости (7); красным цветом — расчеты с учетом зависимости (6)

Fig. 1. Situational plan with geotechnical monitoring results and design influence zones: green color — calculations based on relationship (5); blue color — calculations based on relationship (7); red color — calculations based on relationship (6)

полностью. Исследования [26, 27] показали, что даже при устройстве противофильтрационной завесы за ней фиксируется избыточное поровое давление. В связи с этим при вычислении ожидаемого подъема параметр не обнулялся, а закладывался на уровне 50 % от результата, полученного по выражению (1). Радиус зоны влияния для такой области предлагается не определять.

3. Избыточное поровое давление распространяется только в горизонтальном направлении и не возникает ниже отметки вдавливания свай.

4. В пределах одного инженерно-геологического элемента избыточное поровое давление постоянно по глубине. Это является следствием выражения (1).

Положение эквивалентной полости совпадает с геометрическим центром группы свай и в соответствии с выражением (3) равняется:

$$R_{э.п} = \sqrt{\frac{V_{\text{выт}}}{\pi \cdot H}} = \sqrt{\frac{527 \cdot 0,35^2 \cdot 24}{\pi \cdot 24}} \approx 4,5 \text{ м.}$$

С целью наглядности результаты расчетов по выражениям (1), (4) и (9) представлены в табл. 2 для разных корреляционных зависимостей, используемых при определении недренированной прочности грунта.

Для каждого расчетного случая на ситуационном плане (рис. 1) приведены максимальные расчетные зоны влияния. Наилучшее соответствие данным натурных наблюдений в рассматриваемых условиях про-

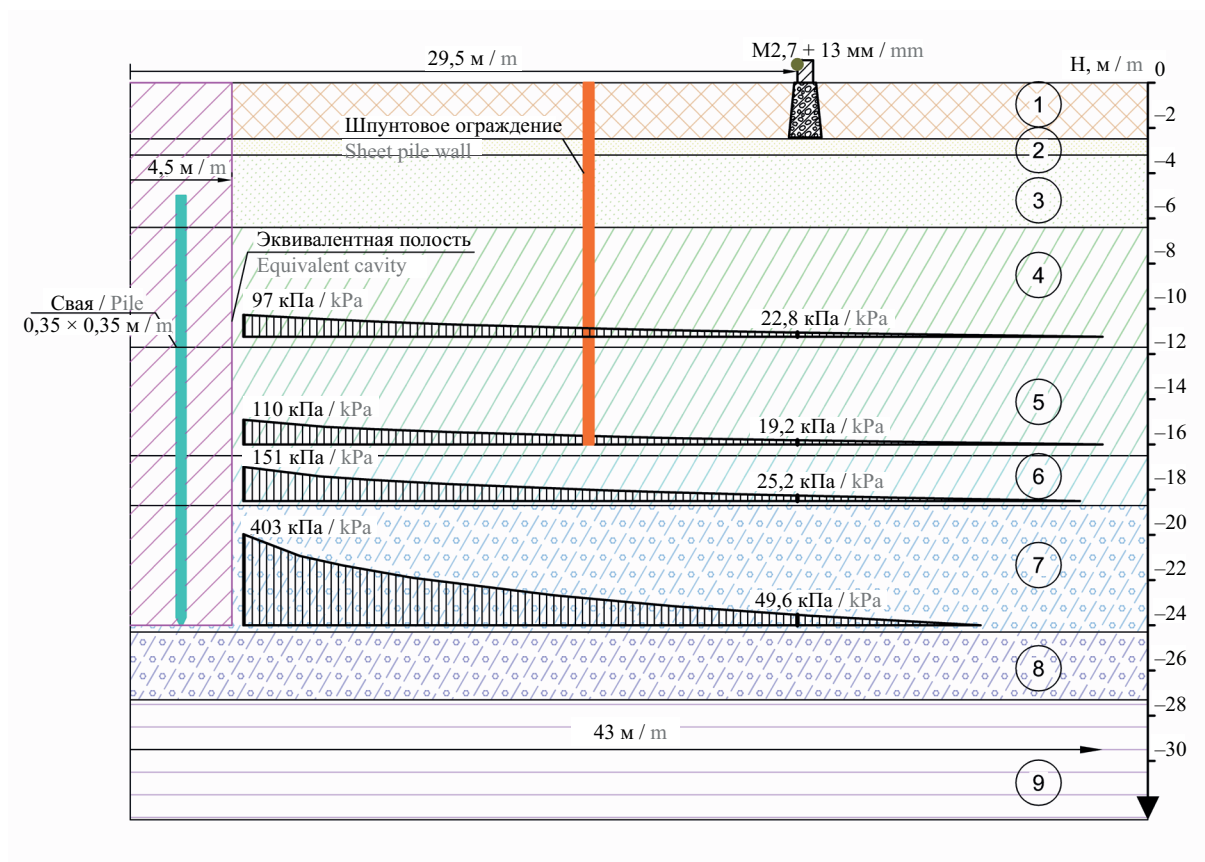


Рис. 2. Эпюры распределения избыточного порового давления, рассчитанные с использованием недренированной прочности грунта по зависимости (7)

Fig. 2. Distribution diagrams of excess pore pressure calculated using the undrained shear strength of soil according to the correlation (7)

демонстрировала корреляционная зависимость (7), связывающая недренированную прочность с природной влажностью.

Для оценки ожидаемого подъема окружающей застройки была выбрана точка, соответствующая геодезической марке 2.7 и находящейся на расстоянии 29,5 м от центра эквивалентной полости. По результатам мониторинга максимальная зафиксированная деформация по ней составила +13 мм, что практически полностью совпало с прогнозируемым значением +13,2 мм, определенным по формуле (9), используя зависимость для недренированной прочности грунта (7).

Приведенные на рис. 2 эпюры избыточного порового давления, вычисленные в соответствии с выражением (1), демонстрируют следующую закономерность: увеличение прочности глинистых грунтов сопровождается как ростом абсолютных значений давления, так и повышением скорости его затухания с расстоянием. При этом для менее прочных грунтов характерно увеличение радиуса зоны возможного воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предлагаемая методика оценки радиуса влияния и возможного подъема окружающего грунтового мас-

сива от погружения вдавливаемых свай с инженерной точностью показала хорошую сходимость с натурными наблюдениями на строительной площадке в г. Санкт-Петербурге.

Принятые расчетные допущения позволяют применять данный подход только в качестве предварительного анализа, так как не учитывается вся сложность и многофакторность рассматриваемой задачи. Для дальнейшего уточнения прогноза рекомендуется использовать численное моделирование.

Поскольку получаемые результаты существенно зависят от характеристик недренированной прочности грунта, в расчетах следует принимать показатели, полученные в ходе прямых трехосных лабораторных испытаний. При использовании региональных корреляционных зависимостей рекомендуется выбирать величины, обеспечивающие расчет с запасом.

Согласно теоретическому решению, размер возможной зоны влияния будет больше для грунтов с более низким показателем сопротивления недренированному сдвигу.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Далматов Б.И., Лапишин Ф.К., Россихин Ю.В. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов. Л. : Стройиздат, 1975. 240 с.
2. Мангушев Р.А. Геотехника Санкт-Петербурга. М. : Изд-во АСВ, 2010. 259 с. EDN QNPABT.
3. Мангушев Р.А., Осокин А.И., Усманов Р.А. Устройство и реконструкция оснований и фундаментов на слабых и структурно-неустойчивых грунтах : монография. СПб. : Лань, 2018. 460 с. EDN WAKCQP.
4. Мангушев Р.А., Знаменский В.В., Готман А.Л., Пономарев А.Б. Сваи и свайные фундаменты. Конструкции, проектирование и технологии. М. : Изд-во АСВ, 2021. 311 с.
5. Гайдо А.Н. Пути совершенствования технологических решений устройства свайных фундаментов жилых зданий в условиях городской застройки // Жилищное строительство. 2015. № 9. С. 12–15. EDN VCLZNH.
6. Юцубе С.В., Сулима В.А., Тарасов А.А. Экспериментальные исследования взаимодействия свай с водонасыщенным глинистым грунтом при их погружении вдавливанием // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 3 (56). С. 179–185. EDN WAGNRL.
7. Омельченко П.Н., Суходуб А.В., Винников Ю.Л. Несущая способность вдавленных призматических свай в водонасыщенных глинистых грунтах // Механика и технологии. 2016. № 3 (53). С. 99–107. EDN WZVQKF.
8. Гайдо А.Н. Методика разработки проектов производства работ на устройство свайных фундаментов в условиях городской застройки // Инженерный вестник Дона. 2023. № 10 (106). С. 399–414. EDN ELXIBB.
9. Дружинин М.С. Анализ влияния погружения заводских железобетонных свай на основания окружающей застройки // Вестник гражданских инженеров. 2025. № 3 (110). С. 84–98. DOI: 10.23968/1999-5571-2025-22-3-84-98. EDN MVMWLA.
10. Улицкий В.М., Шашкин А.Г. Геотехническое обоснование сложных технологий реконструкции и нового строительства // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1997. № 3. С. 3–8. EDN ZJWHBZ.
11. Денисова О.О. Влияние работ по выполнению свай вдавливания и устройству глубинной распорной диафрагмы на дополнительные деформации зданий окружающей застройки // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 5 (100). С. 52–63. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-5-52-63. EDN ZIELVQ.
12. Yang Y., Lei J., Deng D., Zou Y. Laboratory model test and analysis of excess pore water pressure dissipation of pile driven by tapered — perforated tubular pipe pile // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 692. Issue 4. P. 042112. DOI: 10.1088/1755-1315/692/4/042112. EDN WSDWFD.
13. Мангушев Р.А., Бояринцев А.В., Зуев И.И., Камаев И.С. Эффект воздействия изготовления свай «Фундекс» на ранее выполненные конструкции // Жилищное строительство. 2021. № 9. С. 28–35. DOI: 10.31659/0044-4472-2021-9-28-35. EDN KKNVVO.
14. Бахолдин Б.В., Бессмертный А.В., Ястребов П.И. Исследование природы увеличения несущей способности свай, погруженных в глинистые грунты // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2017. № 2. С. 18–21. EDN ZBHHYP.
15. Jackson A. et al. Pore pressure effects in sand and silt during pile jacking // Foundations — Proceedings of the 2nd BGA International Conference on Foundations (ICOF). 2008. Pp. 575–586.
16. Jarushi F., Cosentino P., Kalajian E., Dekhn H. CPT Pore water pressure correlations with PDA to identify pile drivability problem // International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Geophysical Engineering. 2015. Vol. 9. Issue 2. Pp. 55–61.
17. Arafianto A., Rahardjo P. Prediction of excess pore pressure due to pile driving based on CPTu // 20th SEAGC — 3rd AGSSEA Conference in conjunction with 22nd Annual Indonesian National Conference on Geotechnical Engineering. 2018. Pp. 607–610. DOI: 10.5281/zenodo.10466021
18. Wang Y., Liu X., Zhang M., Yang S., Sang S. Field test of excess pore water pressure at pile–soil interface caused by PHC pipe pile penetration based on silicon piezoresistive sensor // Sensors. 2020. Vol. 20. Issue 10. P. 2829. DOI: 10.3390/s20102829. EDN YTQSPF.
19. Pestana J.M., Hunt C.E., Bray J.D. Soil deformation and excess pore pressure field around a closed-ended pile // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2002. Vol. 128. Issue 1. Pp. 1–12. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(2002)128:1(1)
20. Tsegaye A.B. Pore pressure dissipation around driven piles and cone penetration tests-analytical solutions and a simplified approach using the Gauss’ divergence theorem // The Proceedings of the 6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization (ISC2020). 2020. Pp. 1–8.
21. Randolph M.F., Wroth C.P. An analytical solution for the consolidation around a driven pile // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 1979. Vol. 3. Issue 3. Pp. 217–229. DOI: 10.1002/nag.1610030302
22. Лучкин М.А. Учет развития деформации основания во времени при совместном расчете системы

«основание – фундамент – здание»: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. СПб., 2007. 18 с. EDN NIQMPP.

23. Мангушев Р.А., Дьяконов И.П., Баишаков И.Б., Паскачева Д.А., Кравченко П.А. Влияние механизма упрочнения на результаты расчета ограждений котлована в условиях Санкт-Петербурга // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. № 1. С. 59–70. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.6. EDN ZDCDLR.

24. Баишаков И.Б. Влияние воздействия слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов на ограждения котлованов с учетом избыточных поровых давлений: дисс. ... канд. технических наук. СПб., 2025. 174 с.

25. Burns S.E., Mayne P.W. Pore Pressure Dissipation Behavior Surrounding Driven Piles and Cone Penetrometers // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 1999. Vol. 1675. Issue 1. Pp. 17–23. DOI: 10.3141/1675-03

26. Дружинин М.С. Влияние статического вдавливания свай на напряженно-деформированное состояние грунтового основания существующих зданий: результаты натурного крупномасштабного эксперимента // Вестник гражданских инженеров. 2026. № 2 (115). С. 60–70.

27. Дружинин М.С. Численное моделирование процесса массового вдавливания свай // Промышленное и гражданское строительство. 2026. № 4. С. 42–49.

Поступила в редакцию 10 марта 2026 г.

Принята в доработанном виде 21 мая 2026 г.

Одобрена для публикации 21 мая 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Рашид Абдуллович Мангушев** — доктор технических наук, профессор, директор научного и производственно-консалтингового центра геотехнологий (подразделение); **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; SPIN-код: 5122-4105, Scopus: 6602448617, ResearcherID: A-6752-2017, ORCID: 0009-0002-2924-5960; geotechnica@spbgasu.ru, ramangushev@yandex.ru;

Михаил Сергеевич Дружинин — аспирант, инженер; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; SPIN-код: 7747-3391, ResearcherID: OOK-7995-2025, ORCID: 0009-0004-7478-6090; rector@spbgasu.ru, dms95@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Dalmatoff B.I., Lapshin F.K., Rossikhin Yu.V. *Design of pile foundations in weak soil conditions*. Lenin-grad, Stroyizdat, 1975; 240. (rus.).

2. Mangushev R.A. *Geotechnics of St. Petersburg*. Moscow, ASV Publishing House, 2010; 259. EDN QNPABT. (rus.).

3. Mangushev R.A., Osokin A.I., Usmanov R.A. *Construction and reconstruction of bases and foundations on weak and structurally unstable soils: monograph*. St. Petersburg, Lan', 2018; 456. EDN WAKCQP. (rus.).

4. Mangushev R.A., Znamensky V.V., Gotman A.L., Ponomarev A.B. *Piles and pile foundations. Structures, design and technologies*. Moscow, ASV Publishing House, 2021; 311. (rus.).

5. Gaydo A.N. Ways of improving technological solutions of construction of pile foundations of residential buildings under conditions of urban development. *Housing Construction*. 2015; 9:12-15. EDN VCLZNH. (rus.).

6. Yushchube S.V., Sulima V.A., Tarasov A.A. Experimental research of pile interaction in water-deposited clay soil during indentation. *Journal of Construction and Architecture*. 2016; 3(56):179-185. EDN WAGNRL. (rus.).

7. Omelchenko P.N., Sukhodub A.V., Vynnykov Yu.L. Bearing capacity of jacked prismatic piles in saturated clay soils. *Mechanics and Technologies*. 2016; 3(53):99-107. EDN WZVQKF. (rus.).

8. Gaido A.N. Methodology for the development of projects for the construction of pile foundations in urban development. *Engineering journal of Don*. 2023; 10(106):399-414. EDN ELXIBB. (rus.).

9. Druzhinin M.S. Analysis of the impact of submer-sion of factory reinforced concrete piles on the foundations of the adjacent development. *Bulletin of Civil Engineers*. 2025; 3(110):84-98. DOI: 10.23968/1999-5571-2025-22-3-84-98. EDN MVMWLA. (rus.).

10. Ulitskii V.M., Shashkin A.G. Geotechnical basis of complex procedures for reconstruction and new construction. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1997; 3:3-8. EDN ZJWHBZ. (rus.).

11. Denisova O.O. The influence of indentation piles and deep spacer diaphragm on additional deformations of the surrounding buildings. *Bulletin of Civil Engineers*. 2023; 5(100):52-63. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-5-52-63. EDN ZIELVQ. (rus.).

12. Yang Y., Lei J., Deng D., Zou Y. Laboratory model test and analysis of excess pore water pressure dissipation of pile driven by tapered — perforated tubular pipe pile. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 692(4):042112. DOI: 10.1088/1755-1315/692/4/042112. EDN WSDWFD.
13. Mangushev R.A., Boyarintsev A.V., Zuev I.I., Kamaev I.S. Effect of the impact of making “Fundex” piles on previously completed structures. *Housing Construction*. 2021; 9:28-35. DOI: 10.31659/0044-4472-2021-9-28-35. EDN KKNVVO. (rus.).
14. Bakhholdin B.V., Bessmertny A.V., Yastrebov P.I. Increased bearing capacity of piles driven in clay. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2017; 2:18-21. EDN ZBHHP. (rus.).
15. Jackson A. et al. Pore pressure effects in sand and silt during pile jacking. *Foundations — Proceedings of the 2nd BGA International Conference on Foundations (ICOF)*. 2008; 575-586.
16. Jarushi F., Cosentino P., Kalajian E., Dekhn H. CPT Pore water pressure correlations with PDA to identify pile drivability problem. *International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*. 2015; 9(2):55-61.
17. Arafianto A., Rahardjo P. Prediction of excess pore pressure due to pile driving based on CPTu. *20th SEAGC — 3rd AGSSEA Conference in conjunction with 22nd Annual Indonesian National Conference on Geotechnical Engineering*. 2018; 607-610. DOI: 10.5281/zenodo.10466021
18. Wang Y., Liu X., Zhang M., Yang S., Sang S. Field test of excess pore water pressure at pile–soil interface caused by PHC pipe pile penetration based on silicon piezoresistive sensor. *Sensors*. 2020; 20(10):2829. DOI: 10.3390/s20102829. EDN YTQSPF.
19. Pestana J.M., Hunt C.E., Bray J.D. Soil deformation and excess pore pressure field around a closed-ended pile. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2002; 128(1):1-12. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(2002)128:1(1)
20. Tsegaye A.B. Pore pressure dissipation around driven piles and cone penetration tests-analytical solutions and a simplified approach using the Gauss’ divergence theorem. *The Proceedings of the 6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization (ISC2020)*. 2020; 1-8.
21. Randolph M.F., Wroth C.P. An analytical solution for the consolidation around a driven pile. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 1979; 3(3):217-229. DOI: 10.1002/nag.1610030302
22. Luchkin M.A. *Accounting for the development of foundation deformations over time in the combined calculation of the “foundation – foundation – building” system*. St. Petersburg, 2007; 18. EDN NIQMPP. (rus.).
23. Mangushev R.A., Diakonov I.P., Bashmakov I.B., Paskacheva D.A., Kravchenko P.A. The influence of the hardening mechanism on the results of the calculation of pit fences in the conditions of St. Petersburg. *Construction: Science and Education*. 2025; 15(1):59-70. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.6. EDN ZDCDLR. (rus.).
24. Bashmakov I.B. *Influence of weak water-saturated silty-clay soils on excavation walls accounting for excess pore pressures*. St. Petersburg, 2025; 174. (rus.).
25. Burns S.E., Mayne P.W. Pore Pressure Dissipation Behavior Surrounding Driven Piles and Cone Penetrometers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1999; 1675(1): 17-23. DOI: 10.3141/1675-03
26. Druzhinin M.S. Influence of static pile pressing on the stress-strain state of the soil base of existing buildings: results of a full-scale large-scale experiment. *Bulletin of Civil Engineers*. 2026; 2(115):60-70. (rus.).
27. Druzhinin M.S. Numerical modeling of the process of mass pile pressing. *Industrial and Civil Engineering*. 2026; 4:42-49. (rus.).

Received March 10, 2026.

Adopted in revised form on May 21, 2026.

Approved for publication on May 21, 2026.

B I O N O T E S : **Rashid A. Mangushev** — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Director of the Geotechnology Science and Production Consulting Center (subdivision); **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; build. 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; SPIN-code: 5122-4105, Scopus: 6602448617, ResearcherID: A-6752-2017, ORCID: 0009-0002-2924-5960; geotechnica@spbgasu.ru, ramangushev@yandex.ru;

Mikhail S. Druzhinin — postgraduate student, engineer; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; build. 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; SPIN-code: 7747-3391, ResearcherID: OOK-7995-2025, ORCID: 0009-0004-7478-6090; rector@spbgasu.ru, dms95@mail.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

Композиционный бетон с применением вторичного полимерного сырья: систематический обзор

Анастасия Александровна Павловская¹, Анастасия Олеговна Носова²,
Майя Валерьевна Успенская^{1,3}

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);
г. Санкт-Петербург, Россия;

² Национальный исследовательский университет ИТМО; г. Санкт-Петербург, Россия;

³ Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ); г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. С увеличением производства пластмасс и ростом объемов пластиковых отходов проблема их переработки приобретает все большую актуальность. Использование вторичных полимеров в строительной отрасли способствует более рациональному потреблению природных ресурсов, а также снижению затрат на производство строительных материалов. Проведен обзор с целью исследования изменений физико-механических характеристик композиционного бетона с применением отходов полипропилена (ПП) и полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) в качестве мелкого и крупного заполнителя.

Материалы и методы. Выполнены анализ, обобщение и систематизация данных из открытых отечественных и зарубежных источников. Изучен практический опыт использования вторичных полимеров в производстве композиционного бетона для оценки влияния уровня замены традиционного заполнителя отходами ПП и ПЭВП на прочностные свойства бетона.

Результаты. Систематизированы сведения о характеристиках используемых пластиковых отходов, технологиях изготовления композиционного бетона и его свойствах. Осуществлен сравнительный анализ изменения прочностных характеристик бетона в зависимости от параметров замещения природного заполнителя вторичными ПП и ПЭВП.

Выводы. Анализ научной литературы, посвященной вопросам применения пластиковых отходов в производстве бетона, демонстрирует значительный потенциал данной области исследований. Наибольшую целесообразность имеет использование вторичных ПЭВП и ПП ввиду их широкой распространенности и простоты переработки. При введении данных отходов в состав бетонной смеси наблюдается общая тенденция к снижению прочности материала при увеличении их количества, однако в отдельных случаях может происходить улучшение этого показателя по сравнению с контрольными образцами. Актуальным представляется дальнейшее изучение физико-механических характеристик бетона с использованием смеси отходов ПП и ПЭВП, а также определение оптимальных пропорций компонентов и технологии производства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: композиционный бетон, пластиковый заполнитель, полимерные отходы, полипропилен, полиэтилен высокой плотности, вторичное сырье, прочностные характеристики

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Павловская А.А., Носова А.О., Успенская М.В. Композиционный бетон с применением вторичного полимерного сырья: систематический обзор // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 6. С. 931–963. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.931-963

Автор, ответственный за переписку: Анастасия Александровна Павловская, pavlovskaa.aa@gmail.com.

Concrete composites incorporating recycled polymer materials: a systematic review

Anastasiya A. Pavlovskaya¹, Anastasiia O. Nosova², Mayya V. Uspenskaya^{1,3}

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); Saint Petersburg, Russian Federation;

² ITMO University; Saint Petersburg, Russian Federation;

³ Saint-Petersburg State University; Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. With the growth of plastic production and the accumulation of plastic waste, recycling is becoming increasingly important. The incorporation of recycled polymers in the construction industry promotes a more rational use of natural resources and can reduce the cost of building materials. This article reviews studies examining changes in the physical and mechanical properties of concrete composites containing polypropylene (PP) and high-density polyethylene (HDPE) waste used as partial replacements for fine and coarse aggregates.

Materials and methods. A systematic analysis, generalization, and synthesis of data from open-access Russian and international sources were performed. Practical experience in the use of recycled polymers for producing concrete composites was examined to assess the effect of replacing conventional aggregates with PP and HDPE waste on the strength properties of concrete.

Results. Data on the characteristics of plastic waste, technologies for manufacturing concrete composites, and the resulting material properties were systematized. The authors conducted a comparative analysis of changes in the strength characteristics of concrete depending on the parameters of natural aggregate replacement with recycled PP and HDPE.

Conclusions. Analysis of the scientific literature on the application of plastic waste in concrete production demonstrates the significant potential of this research area. The use of recycled HDPE and PP appears particularly feasible because of their widespread availability and ease of processing. When these wastes are incorporated into concrete mixtures, material strength generally decreases with increasing waste content. However, in some cases, strength improvements compared with control specimens have been reported. Further research on the physical and mechanical properties of concrete containing combined PP and HDPE waste, as well as the determination of optimal component proportions and production technologies, remains relevant.

KEYWORDS: concrete composite, plastic aggregate, plastic waste, polypropylene, high-density polyethylene, recycled material, strength characteristics

FOR CITATION: Pavlovskaya A.A., Nosova A.O., Uspenskaya M.V. Concrete composites incorporating recycled polymer materials: a systematic review. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(6):931-963. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.931-963 (rus.).

Corresponding author: Anastasiya A. Pavlovskaya, pavlovskaya.aa@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Пластмассы играют важную роль в различных отраслях промышленности. Из них производят множество товаров, что обусловлено их широким применением. Однако рост производства первичных пластмасс, наблюдаемый в последние годы, приводит к увеличению объемов пластиковых отходов. Так как пластик практически не разлагается биологически и содержит токсичные вещества, он служит серьезным источником загрязнения, накопление которого неизбежно приведет к экологической катастрофе [1–4]. Поэтому утилизация пластиковых отходов представляет собой актуальную проблему.

В отличие от захоронения и сжигания, которые наносят значительный вред природе, загрязняя почву, грунтовые воды и атмосферу, переработка и повторное использование — наиболее предпочтительные способы утилизации. Рециклинг не только способствует сокращению объема образующихся отходов, но и позволяет извлекать ценные для различных отраслей экономики вторичные ресурсы [5–8]. Тем не менее в России практика переработки пластиковых отходов до сих пор не получила широкого распространения. Более высокими уровнями сбора и утилизации обладают отходы полиэтилена (ПЭ) и полипропилена (ПП) — 20 и 17 % соответственно. Для полиэтиленотерефталата (ПЭТ) и полистирола данный показатель составил 12 %, а для поливинилхлорида (ПВХ) — 10 % [9, 10].

Отходы полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) и ПП помимо высоких показателей сбора и утилизации также являются наиболее простыми для переработки, так как не требуют сложных методов подготовки, поскольку не испытывали значительных нагрузок в процессе эксплуатации. Кроме того, они более устойчивы к атмосферным воздействиям, чем полиэтилен низкой плотности [11–13].

Также стоит отметить, что ПЭ и ПП — наиболее распространенные виды пластика. На изделия из ПЭ приходится 24 % всего объема производства пласт-

масс, а из ПП — 16,6 %. В то время как ПВХ составляет 11,4 %, полиуретан — 5,5 %, полистирол — 6,1 % и ПЭТ — 5,3 % [14]. Эти данные свидетельствуют о значительной доле отходов, образующихся в результате использования ПЭ и ПП, что, в свою очередь, создает обширную базу для вторичного использования данного сырья.

В настоящее время строительная индустрия характеризуется активным развитием, что приводит к увеличению спроса на строительные материалы. Использование вторичного полимерного сырья для их производства способствует оптимизации потребления природных ресурсов и снижению затрат на утилизацию отходов. Это позволяет уменьшить себестоимость материалов и расходы на их транспортировку [15–19].

Бетон — один из востребованных строительных материалов. Использование в его составе отходов пластмасс может улучшить некоторые свойства, такие как теплопроводность, износостойкость, устойчивость к эрозии и химическим воздействиям. Также добавление вторичных полимеров помогает уменьшить усадку и предотвратить образование микротрещин. Применение бетонов с использованием полимерных отходов может быть перспективным в производстве напольных покрытий, элементов мощения, фасадных панелей и стеновых блоков [20–30]. В связи с этим в последние годы наблюдается рост числа научных публикаций, посвященных изучению композиционного бетона с добавлением вторичных полимеров.

На рис. 1 показан график изменения количества опубликованных научных работ за 2014–2024 гг., созданный при помощи сайта Dimensions¹. Поиск статей был осуществлен по таким ключевым словам, как concrete, plastic waste, recycled plastic, plastic aggregate, mechanical properties и workability properties. Согласно графику, с 2014 по 2024 г. число

¹ Dimensions. URL: <https://www.dimensions.ai/>

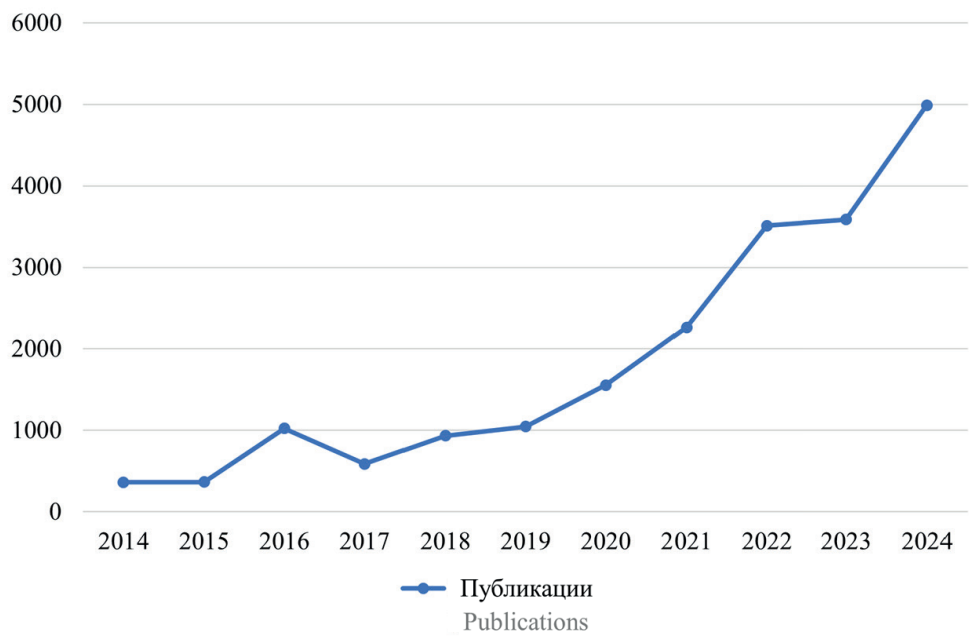


Рис. 1. Количество публикаций по теме применения вторичных полимеров для изготовления композиционного бетона за 2014–2024 гг.

Fig. 1. Number of publications on the use of secondary polymers in composite concrete production, 2014–2024

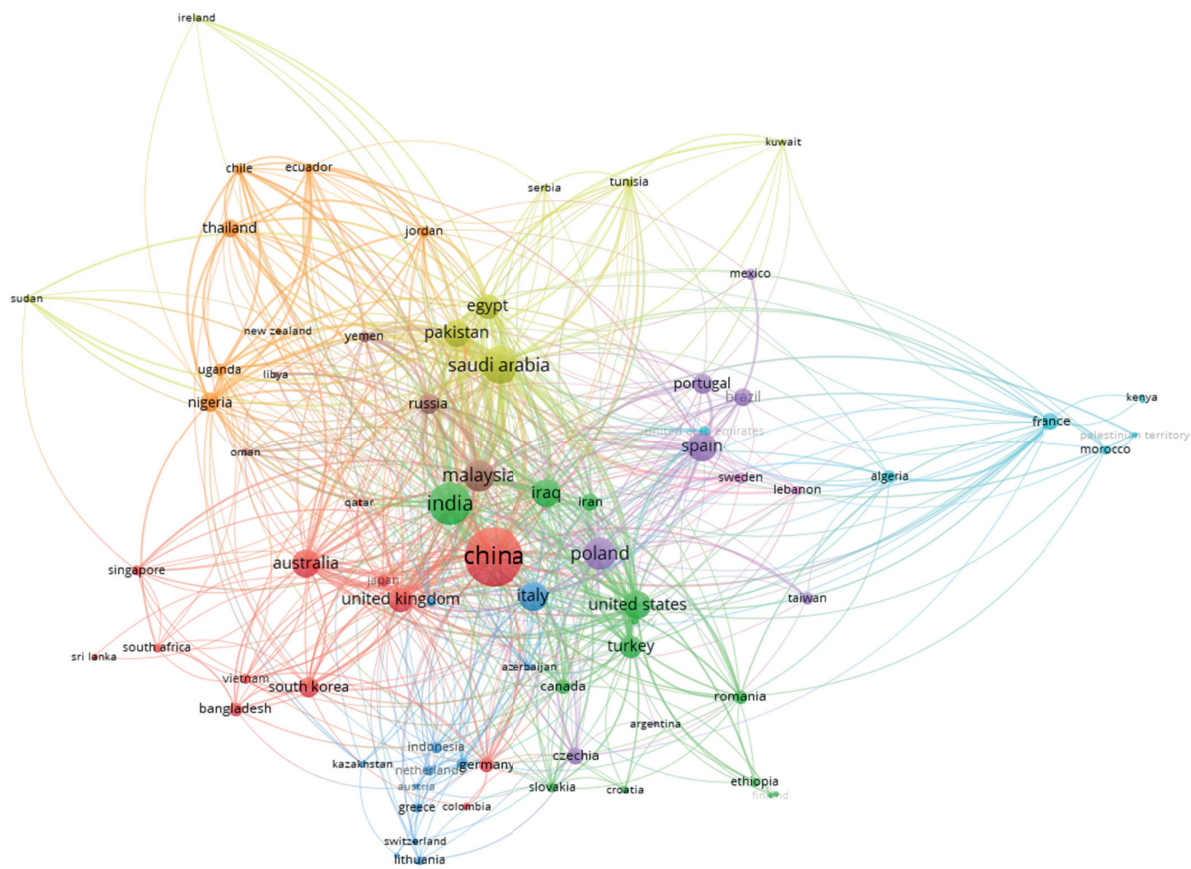


Рис. 2. Международное сотрудничество в области научных исследований по теме использования вторичных полимеров в производстве композиционного бетона

Fig. 2. International research collaboration on the use of secondary polymers in the production of composite concrete

публикаций увеличилось в 13,7 раз с 364 до 4989 соответственно.

Анализ сотрудничества в области публикационной активности также демонстрирует растущий интерес к теме использования полимерных отходов для получения композиционного бетона со стороны различных стран и регионов. На рис. 2, созданном в программе VOSviewer на основе загруженной с сайта Dimensions базы данных статей, опубликованных с 2020 по 2025 г., отображено международное сотрудничество в сфере научных публикаций, посвященных этому вопросу. Он наглядно демонстрирует, что Китай, Индия и Саудовская Аравия занимают лидирующие позиции по количеству публикаций в этой области. Наиболее тесное сотрудничество наблюдается между Китаем и Австралией, Саудовской Аравией и Малайзией, а также у Пакистана и Египта с Саудовской Аравией. В России количество опубликованных научных работ за рассматриваемый период значительно меньше, а наиболее активное взаимодействие осуществлялось с Саудовской Аравией и Малайзией.

Таким образом, все вышесказанное подтверждает актуальность изучения вопроса применения вторичного ПП и ПЭВП для изготовления бетона. В настоящей статье анализируется изменение физико-механических свойств композиционного бетона при использовании отходов ПП и ПЭВП.

Цель исследования — сбор и обобщение практического опыта изготовления данного материала, а также результатов его испытаний для оценки влияния степени замещения традиционного заполнителя вторичными ПП и ПЭВП на прочностные характеристики бетона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках исследования проведен анализ научных публикаций, посвященных применению вторичного полимерного сырья для производства бетонных изделий. В качестве основных источников информации были использованы: российская электронная библиотека eLIBRARY и зарубежная научная база данных Scopus. Отбор публикаций осуществлялся с учетом временного критерия: рассматривались работы, опубликованные за последние 10 лет.

В результате обзора литературы систематизированы все данные о характеристиках используемых пластиковых отходов, а также о технологии изготовления композиционного бетона и полученных значений его физико-механических свойств. Это позволило выполнить сравнительный анализ и выявить общие тенденции изменения основных параметров материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам анализа научных работ можно судить о высоком интересе к проблематике ис-

пользования вторичных полимеров в производстве композиционного бетона. Стоит отметить, что количество иностранных публикаций значительно превосходит отечественные. При этом зарубежные исследования в этой области в основном носят экспериментальный характер в отличие от российских, которые, в свою очередь, преимущественно сосредоточены на теоретических аспектах, а также обобщении и анализе существующих публикаций [15, 20, 31–33].

Основными физико-механическими свойствами, характеризующими бетон, являются плотность, удобоукладываемость, прочность на сжатие, прочность на растяжение при раскалывании, прочность на изгиб, а также теплопроводность, водопоглощение, морозостойкость, и истираемость. Значения этих параметров определяют качество материала и допустимые виды его применения. Именно поэтому анализ вышеперечисленных характеристик становится неотъемлемой частью исследований, посвященных влиянию пластиковых отходов на свойства композиционного бетона. В табл. 1–3 отражены изменения свойств бетона при добавлении в него вторичных полимеров в разных количествах и размерах.

Анализ данных, представленных в табл. 1–3, позволяет констатировать, что наиболее глубоко исследованы свойства бетона, содержащего отходы одного вида полимеров, таких как ПП и ПЭВП. Лишь в небольшом проценте исследований рассматривается бетон с добавлением смеси различных полимеров.

Пластиковые отходы могут быть включены в бетонную смесь в качестве мелкого и крупного заполнителя, а также использоваться в виде волокон [57–59]. В работах, посвященных изучению бетона с добавлением полимерных волокон, их содержание составляет 0,25–1,5 % [34, 42, 44, 46]. Количество полимерных отходов, добавляемое в качестве мелкого заполнителя, составляет 0,5–75 % [35, 36, 40–42, 45, 48–50, 54]. А содержание вторичных полимеров в крупном заполнителе рассматривается в диапазоне 1–60 % [37–39, 43, 49, 51–53]. Таким образом, целесообразным будет являться изучение бетона, содержащего смесь вторичного ПП и вторичного ПЭВП в качестве заполнителя.

Во всех публикациях, освещающих практический опыт применения пластиковых отходов в качестве заполнителя для бетонной смеси и свойства полученного материала, авторы определяли прочностные характеристики образцов, такие как прочность на сжатие и в некоторых случаях прочность на растяжение при раскалывании и на изгиб.

На рис. 3 представлены графики, отражающие изменение прочности на сжатие бетона, содержащего отходы из ПП в качестве мелкого и крупного заполнителя соответственно.

На основании представленной на рис. 3 информации представляется возможным сделать вывод

Табл. 1. Свойства бетона, содержащего отходы ПП

Table 1. Properties of concrete containing polypropylene waste

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
4 × 50	0,25–0,75	• прочность на сжатие увеличилась на 20,75 и 10,91 % при добавлении 0,25 и 0,5 % отходов ПП соответственно. Содержание 0,75 % вторичного ПП привело к уменьшению данного показателя на 10,91 %; • прочность на изгиб уменьшилась на 5,25–46,35 % • 0.25 and 0.5 % of PP waste added to the concrete mix rose compressive strength by 20.75 and 10.91 %, respectively. 0.75 % of secondary PP reduced compressive strength by 10.91 %; • flexural strength reduced by 5.25–46.35 %	З.А. Алиев [34] Z.A. Aliev [34]
3	10–40	• прочность на сжатие уменьшилась на 25,86–58,06 %; • прочность на растяжение при раскалывании уменьшилась на 0,78–45,88 %; • осадка конуса уменьшилась на 1,22 % при добавлении 10 % вторичного ПП. Добавление 20–30 % отходов из ПП привело к увеличению осадки конуса на 2,44–7,32 %; • плотность образцов уменьшилась на 2,20–10,59 % • compressive strength reduced by 25.86–58.06 %; • splitting tensile strength reduced by 0.78–45.88 %; • 10 % of recycled PP reduced slump by 1.22 %. 20–30 % of PP waste rose slump by 2.44–7.32 %; • the specimen density decreased by 2.20–10.59 %	М. Sofyan и соавт. [35] M. Sofyan et al. [35]
–	8–40	• прочность на сжатие уменьшилась на 5,88–41,18 %; • осадка конуса уменьшилась на 53,8–80,7 %; • плотность бетонной смеси уменьшилась на 3,6–12,3 %; • теплопроводность уменьшилась на 6,6–49,1 % • compressive strength decreased by 5.88–41.18 %; • slump decreased by 53.8–80.7 %; • density of the concrete mix decreased by 3.6–12.3 %; • thermal conductivity of the concrete mix decreased by 6.6–49.1 %	S.N. Ahmed и соавт. [36] S.N. Ahmed et al. [36]
≤4,75	20–60	• прочность на сжатие уменьшилась на 3,34–11,19 %; • прочность на растяжение при раскалывании уменьшилась на 4,96–22,74 % • compressive strength decreased by 3.34–11.19 %; • split tensile strength decreased by 4.96–22.74 %	D.C. Naveen и соавт. [37] D.C. Naveen et al. [37]
≤20	10–30	• прочность на сжатие уменьшилась на 17,81–42,5 %; • прочность на изгиб уменьшилась на 18,41–35,2 %; • содержание отходов ПП в количестве 10 % привело к увеличению осадки конуса на 7,14 %. При добавлении 20 % осадка конуса не отличалась от значения смеси, не содержащей полимерные отходы. При добавлении 30 % данный показатель уменьшился на 18,75 %; • водопоглощение увеличилось на 7,33–13,14 %; • при добавлении 10–20 % отходов износостойкость уменьшилась на 22,93–6,69 %. Добавление 30 % вторичного ПП увеличило данный показатель на 10,51 % • compressive strength decreased by 17.81–42.5 %; • flexural strength decreased by 18.41–35.2 %; • a 10 % PP waste content led to a 7.14 % increase in slump. At 20 % PP waste content, the slump was comparable to that of the reference concrete mix without polymer waste. However, with 30 % PP waste addition, the slump decreased by 18.75 %; • water absorption increased by 7.33–13.14 %; • the incorporation of 10–20 % polymer waste reduced wear resistance by 6.69–22.93 %, whereas the addition of 30 % recycled PP increased this property by 10.51 %	М. Abu-Saleem и соавт. [38] M. Abu-Saleem et al. [38]

Продолжение табл. 1 / Continuation of the Table 1

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
—	10–30	• прочность на сжатие увеличилась на 5,39 % при добавлении 10 % вторичного ПП. Добавление 20–30 % отходов привело к уменьшению данного показателя на 16,22–15,43 %; • прочность на растяжение при раскалывании уменьшилась на 9,45 и 0,5 % при добавлении 10 и 30 % вторичного ПП соответственно; • содержание отходов в количестве 20 % привело к увеличению данного показателя на 16,92 %; • прочность на изгиб уменьшилась на 11,43–5,71 %; • увеличение количества отходов уменьшает осадку конуса бетона • compressive strength increased by 5.39 % with the addition of 10 % recycled PP. However, the addition of 20–30 % recycled PP reduced compressive strength by 16.22–15.43 %, respectively; • splitting tensile strength decreased by 9.45 and 0.50 % with the addition of 10 and 30 % recycled PP, respectively, whereas the incorporation of 20 % recycled PP increased this property by 16.92 %; • flexural strength decreased by 5.71–11.43 %; • increasing the recycled PP content reduced the slump	M. Karthik и соавт. [39] M. Karthik et al. [39]
2–4	5–25	• прочность на сжатие уменьшилась на 10,05–57,94 %; • прочность на растяжение при раскалывании уменьшилась на 4,45–37 %; • прочность на изгиб уменьшилась на 9,33–53,33 %; • осадка конуса уменьшилась на 16,67 и 8,33 % при добавлении 5 и 15 % вторичного ПП соответственно. Содержание отходов в количестве 10, 20 и 25 % привело к увеличению данного показателя на 25, 8,33 и 25 % соответственно • compressive strength decreased by 10.05–57.94 %; • splitting tensile strength decreased by 4.45–37.00 %; • flexural strength decreased by 9.33–53.33 %; • slump decreased by 16.67 and 8.33 % with the addition of 5 and 15 % secondary PP, respectively; • secondary PP contents of 10, 20, and 25 % increased this property by 25.00, 8.33 and 25.00 %, respectively	M. Harihanandh и соавт. [40] M. Harihanandh et al. [40]
0–3; 3–8	25–75	• прочность на сжатие уменьшилась на 27,43–85,14 %; • модуль упругости уменьшился на 29,23–85,08 %; • увеличение количества отходов уменьшает осадку конуса бетона; Содержание 75 % вторичного ПП уменьшило данный показатель на 46 %; • теплопроводность уменьшилась на 28,49–66,13 % • compressive strength decreased by 27.43–85.14 %; • elastic modulus decreased by 29.23–85.08 %; • increasing the amount of waste reduces the slump; the incorporation of 75 % recycled PP reduced this property by 46 %; • thermal conductivity decreased by 28.49–66.13 %	M. Belmokaddem и соавт. [41] M. Belmokaddem et al. [41]
1,1 × 0,6	0,5–1	• прочность на сжатие уменьшилась на 14,6 %; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 75,16–9,8 %; • осадка конуса уменьшилась на 24–22,8 % • compressive strength decreased by 14.6 %; • the split tensile strength increased by 75.16–9.8 %; • the slump decreased by 24–22.8 %	J.K. Park и соавт. [42] J.K. Park et al. [42]
1,4 × 0,1		• прочность на сжатие уменьшилась на 11,40–22,53 %; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 52,28–36,6 %; • осадка конуса уменьшилась на 16–15,2 % • compressive strength decreased by 11.40–22.53 %; • splitting tensile strength increased by 52.28–36.6 %; • slump decreased by 16–15.2 %	

Продолжение табл. 1 / Continuation of the Table 1

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
≤19	10–30	• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,42 увеличилась на 10,71 % при добавлении 10 % вторичного ПП. Содержание отходов в количестве 20–30 % уменьшило данный показатель на 14,29–21,43 %; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,48 увеличилась на 38,46–7,69 %, для бетона с соотношением 0,57 увеличилась на 34,48–30,34 %; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,42 увеличилась на 1,49 % при добавлении 10 % вторичного ПП. Содержание отходов в количестве 20–30 % уменьшило данный показатель на 1,49–13,43 %; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,48 уменьшилась на 11,43–28,57 %, для бетона с соотношением 0,57 уменьшилась на 21,88–34,38 % • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.42 increased by 10.71% with the addition of 10 % recycled PP. Recycled PP contents of 20–30 % reduced this property by 14.29–21.43 %; • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.48 increased by 7.69–38.46 %, while that of concrete with a water–cement ratio of 0.57 increased by 30.34–34.48 %; • the splitting tensile strength of concrete with a water–cement ratio of 0.42 increased by 1.49 % with the addition of 10 % recycled PP. Recycled PP contents of 20–30 % reduced this property by 1.49–13.43 %; • the splitting tensile strength of concrete with a water–cement ratio of 0.48 decreased by 11.43–28.57 %, while that of concrete with a water–cement ratio of 0.57 decreased by 21.88–34.38 %	M.J. Islam [43] M.J. Islam [43]
0,038 × 13	0,25–0,75	• прочность на сжатие уменьшилась на 18,5 % при добавлении 0,25 % вторичного ПП. Содержание 0,5–0,75 % отходов увеличило данный показатель на 28,4–83,4 %; • прочность на изгиб уменьшилась на 19,2 % при добавлении 0,25 % вторичного ПП. Содержание 0,5–0,75 % отходов увеличило данный показатель на 47,5–72,4 %; • осадка конуса уменьшилась на 4,4 % при добавлении 0,25 % вторичного ПП. Содержание 0,5–0,75 % отходов увеличило данный показатель на 5,5–10 % • compressive strength decreased by 18.5 % with the addition of 0.25 % recycled PP. Recycled PP contents of 0.5–0.75 % increased this property by 28.4–83.4 %; • flexural strength decreased by 19.2 % with the addition of 0.25 % recycled PP. Recycled PP contents of 0.5–0.75 % increased this property by 47.5–72.4 %; • slump decreased by 4.4 % with the addition of 0.25 % recycled PP. Recycled PP contents of 0.5–0.75 % increased this property by 5.5–10 %	S.Z. Abeer и соавт. [44] S.Z. Abeer et al. [44]
≤27,5	2,5–10	• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,45 уменьшилась на 3,67 % при добавлении 2,5 % вторичного ПП. Содержание 5–10 % отходов увеличило данный показатель на 2,37–9,28 %; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,4 уменьшилась на 9,81, 0,47 и 0,7 % при добавлении 2,5, 7,5 и 10 % вторичного ПП соответственно. Содержание 5 % отходов увеличило данный показатель на 7,24 %; • прочность на изгиб бетона с водоцементным соотношением 0,45 уменьшилась на 8,12 % при добавлении 2,5 и 10 % вторичного ПП. Содержание 5–7,5 % отходов увеличило данный показатель на 2,71–10 %; • прочность на изгиб бетона с водоцементным соотношением 0,4 уменьшилась на 1,92 и 5,77 % при добавлении 2,5 и 10 % вторичного ПП. Содержание 5–7,5 % отходов увеличило данный показатель на 5,19–12,69 %	Y. Suvidha и соавт. [45] Y. Suvidha et al. [45]

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
≤27,5	2,5–10	• the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.45 decreased by 3.67 % with the addition of 2.5 % recycled PP. Recycled PP contents of 5–10 % increased this property by 2.37–9.28 %; • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.40 decreased by 9.81 %, 0.47 %, and 0.70 % with the addition of 2.5 %, 7.5 %, and 10 % recycled PP, respectively. The incorporation of 5 % recycled PP increased this property by 7.24 %; • the flexural strength of concrete with a water–cement ratio of 0.45 decreased by 8.12 % with the addition of 2.5 and 10 % recycled PP. Recycled PP contents of 5–7.5 % increased this property by 2.71–10.00 %; • the flexural strength of concrete with a water–cement ratio of 0.40 decreased by 1.92 and 5.77 % with the addition of 2.5 and 10 % recycled PP, respectively. Recycled PP contents of 5–7.5 % increased this property by 5.19–12.69 %	Y. Suvidha и соавт. [45] Y. Suvidha et al. [45]
31 × 1	0,5–1,5	• прочность на сжатие бетона с добавлением измельченного полипропиленового волокна увеличилась на 43,4–69,7 %; • прочность на сжатие бетона с добавлением полипропиленового волокна, модифицированного с помощью экструдера, увеличилась на 43,4–62,6 %; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с измельченным волокном увеличилась в 2,2–4,8 раз; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с волокном, модифицированным с помощью экструдера, увеличилась в 2,1–4,1 раз; • прочность на изгиб бетона с измельченным полипропиленовым волокном увеличилась в 2,2–2,8 раз; • прочность на изгиб бетона с волокном, модифицированным с помощью экструдера, увеличилась в 1,4–1,6 раз; • осадка конуса бетона с измельченным волокном уменьшилась на 22,9–85,7 %; • осадка конуса бетона с волокном, модифицированным с помощью экструдера, уменьшилась на 14,3–62,9 % • the compressive strength of concrete containing crushed polypropylene fiber increased by 43.4–69.7 %; • the compressive strength of concrete containing extruder-modified polypropylene fiber increased by 43.4–62.6 %; • the splitting tensile strength of concrete containing crushed polypropylene fiber increased by 2.2–4.8 times; • the splitting tensile strength of concrete containing extruder-modified polypropylene fiber increased by 2.1–4.1 times; • the flexural strength of concrete containing crushed polypropylene fiber increased by 2.2–2.8 times; • the flexural strength of concrete containing extruder-modified polypropylene fiber increased by 1.4–1.6 times; • the slump of concrete containing crushed polypropylene fiber decreased by 22.9–85.7 %; • the slump of concrete containing extruder-modified polypropylene fiber decreased by 14.3–62.9 %	M. Malek и соавт. [46] M. Malek et al. [46]
3 × 3 × 3	10–30	• осадка конуса у смеси с водоцементным соотношением 0,45 снизилась на 18,57–27,14 %, у смеси с водоцементным соотношением 0,55 — на 16–25,33 %; • плотность у образцов с водоцементным соотношением 0,45 снизилась на 6,39–11,44 %, у образцов с водоцементным соотношением 0,55 — на 3,22–10,88 %; • прочность на сжатие у образцов с водоцементным соотношением 0,45 снизилась на 20–48 %, у образцов с водоцементным соотношением 0,55 — на 29–44 % • the slump of the concrete mix with a water–cement ratio of 0.45 decreased by 18.57–27.14 %, while that of the mix with a water–cement ratio of 0.55 decreased by 16.00–25.33 %; • the density of specimens with a water–cement ratio of 0.45 decreased by 6.39–11.44 %, while that of specimens with a water–cement ratio of 0.55 decreased by 3.22–10.88 %; • the compressive strength of specimens with a water–cement ratio of 0.45 decreased by 20–48 %, while that of specimens with a water–cement ratio of 0.55 decreased by 29–44 %	A.O. Irlan и соавт. [47] A.O. Irlan et al. [47]

Табл. 2. Свойства бетона, содержащего отходы ПЭВП

Table 2. Properties of concrete containing high-density polyethylene waste

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
–	5–30	• прочность на сжатие увеличилась на 6,13 % при добавлении 15 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 10,67–23,96 % при добавлении 5–10 % отходов и на 20,15–32,3 % при добавлении 20–30 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании уменьшилась на 14,58–36,44 %; • прочность на изгиб уменьшилась на 18,54–44,13 %; • водопоглощение уменьшилось на 22,67–80,64 %; • осадка конуса уменьшилась на 15,63–62,5 % • compressive strength increased by 6.13 % with the addition of 15 % recycled HDPE. However, it decreased by 10.67–23.96 % with the addition of 5–10 % recycled HDPE and by 20.15–32.30 % with the addition of 20–30 % recycled HDPE; • splitting tensile strength decreased by 14.58–36.44 %; • flexural strength decreased by 18.54–44.13 %; • water absorption decreased by 22.67–80.64 %; • the slump decreased by 15.63–62.50 %	V. Punitha и соавт. [48] Punitha V. et al. [48]
2–10	10–50	• прочность на сжатие уменьшилась на 22–82 %; • модуль упругости уменьшился на 19–47 %; • теплопроводность уменьшилась на 10–33 % • compressive strength decreased by 22–82 %; • elastic modulus decreased by 19–47 %; • thermal conductivity decreased by 10–33 %	M.A. Al-Osta и соавт. [49] M.A. Al-Osta et al. [49]
0,5–2		• прочность на сжатие уменьшилась на 11–72 %; • модуль упругости уменьшился на 17–39 %; • теплопроводность уменьшилась на 10–26 % • compressive strength decreased by 11–72 %; • elastic modulus decreased by 17–39 %; • thermal conductivity decreased by 10–26 %	
0,5–2; 2–10		• прочность на сжатие уменьшилась на 18–77 %; • модуль упругости уменьшился на 20–48 %; • теплопроводность уменьшилась на 8–21 % • compressive strength decreased by 18–77 %; • elastic modulus decreased by 20–48 %; • thermal conductivity decreased by 8–21 %	
≤20	10–30	• прочность на сжатие уменьшилась на 19,69–40 %; • прочность на изгиб уменьшилась на 17,49–30,3 %; • водопоглощение увеличилось 7,33–11,34 %; • износостойкость увеличилась на 14,01–51,91 %; • осадка конуса увеличилась на 9,84 % при добавлении 10 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 5,36–15,18 % при добавлении 20–30 % отходов; • плотность бетонной смеси уменьшилась на 5,2–10,6 % • compressive strength decreased by 19.69–40 %; • flexural strength decreased by 17.49–30.3 %; • water absorption increased by 7.33–11.34 %; • wear resistance increased by 14.01–51.91 %; • the slump increased by 9.84 % with the addition of 10 % recycled HDPE. However, it decreased by 5.36–15.18 % with the addition of 20–30 % recycled HDPE; • density of the concrete mixture decreased by 5.2–10.6 %	M. Abu-Saleem и соавт. [38] M. Abu-Saleem et al. [38]

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
—	10–30	• прочность на сжатие увеличилась на 4,93 % при добавлении 10 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 15,13–32,57 % при добавлении 20–30 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 2,49 % при добавлении 30 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 1,49–27,36 % при добавлении 10–20 % отходов; • прочность на изгиб уменьшилась на 7,43–25,71 % • compressive strength increased by 4.93 % with the addition of 10 % recycled HDPE. However, it decreased by 15.13–32.57 % with the addition of 20–30 % recycled HDPE; • splitting tensile strength increased by 2.49 % with the addition of 30 % recycled HDPE. However, it decreased by 1.49–27.36% with the addition of 10–20 % recycled HDPE; • flexural strength decreased by 7.43–25.71 %	M. Karthik и соавт. [39] M. Karthik et al. [39]
2–4	1–7	• прочность на сжатие уменьшилась на 2,73–9,98 %; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 1,17–2,92 % при добавлении 1–3 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 0,29–3,8 % при добавлении 5–7 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси уменьшилась на 5,6–12,39 % • compressive strength decreased by 2.73–9.98 %; • splitting tensile strength increased by 1.17–2.92 % with the addition of 1–3 % recycled HDPE. However, it decreased by 0.29–3.80 % with the addition of 5–7 % recycled HDPE; • the slump of the concrete mix decreased by 5.60–12.39 %	T. Liu и соавт. [50] T. Liu et al. [50]
2–4	1–15	• прочность на сжатие увеличилась на 0,29–4,33 % при добавлении 1–5 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 7,21–18,26 % при добавлении 7–15 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 2,63–7,02 % при добавлении 1–5 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 8,48–14,33 % при добавлении 7–15 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси уменьшилась на 6,58–12,36 % • compressive strength increased by 0.29–4.33 % with the addition of 1–5 % recycled HDPE. However, it decreased by 7.21–18.26 % with the addition of 7–15 % recycled HDPE; • splitting tensile strength increased by 2.63–7.02 % with the addition of 1–5 % recycled HDPE. However, it decreased by 8.48–14.33 % with the addition of 7–15 % recycled HDPE; • the slump of the concrete mix decreased by 6.58–12.36 %	
≤10	10–30	• прочность на сжатие уменьшилась на 14–33 %; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 4–11 %; • прочность на изгиб увеличилась на 36–49 % • compressive strength decreased by 14–33 %; • splitting tensile strength increased by 4–11 %; • flexural strength increased by 36–49 %	M.M. Radhi и соавт. [51] M.M. Radhi et al. [51]

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
–	1–5	• прочность на сжатие увеличилась на 3,19–22,9 % при добавлении 1–3 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 12,25–13,8 % при добавлении 4–5 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 17,34–84,6 % при добавлении 1–3 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 18,3–26,1 % при добавлении 4–5 % отходов; • прочность на изгиб увеличилась на 1,13–7,95 % при добавлении 1–3 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 4,31–8,63 % при добавлении 4–5 % отходов • compressive strength increased by 3.19–22.90 % with the addition of 1–3 % recycled HDPE. However, it decreased by 12.25–13.80 % with the addition of 4–5 % recycled HDPE; • splitting tensile strength increased by 17.34–84.60 % with the addition of 1–3 % recycled HDPE. However, it decreased by 18.30–26.10 % with the addition of 4–5 % recycled HDPE; • flexural strength increased by 1.13–7.95 % with the addition of 1–3 % recycled HDPE. However, it decreased by 4.31–8.63 % with the addition of 4–5 % recycled HDPE	T.M. Selvi и соавт. [52] T.M. Selvi et al. [52]
0,45 × 40	0,5–1	• прочность на сжатие уменьшилась на 13,35–18,78 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 9,15–14,38 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП; • осадка конуса бетонной смеси уменьшилась на 12–14 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП • compressive strength decreased by 13.35–18.78 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE; • splitting tensile strength increased by 9.15–14.38 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE; • the slump of the concrete mix decreased by 12–14 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE	J.K. Park и соавт. [42] J.K. Park et al. [42]
1,5 × 40		• прочность на сжатие уменьшилась на 5,7–15,30 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 20,26–32,03 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП; • осадка конуса бетонной смеси уменьшилась на 20,4–23,2 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП • compressive strength decreased by 5.70–15.30 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE; • split tensile strength increased by 20.26–32.03 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE; • slump of the concrete mix decreased by 20.4–23.2 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE	
0–3, 3–8	25–75	• увеличение количества ПЭВП в смеси привело к снижению плотности бетона. Максимальное снижение плотности — 46 % при добавлении 75 % отходов; • прочность на сжатие уменьшилась на 44,29–88,57 %; • модуль упругости уменьшился на 32,3–84,92 %; • теплопроводность уменьшилась на 20,97–57,53 % • increasing the HDPE content in the mixture led to a decrease in concrete density. The maximum density reduction was 46 at 75 % waste content; • compressive strength decreased by 44.29–88.57 %; • the elastic modulus decreased by 32.30–84.92 %; • thermal conductivity decreased by 20.97–57.53 %	M. Belmokaddem и соавт. [41] M. Belmokaddem et al. [41]

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
5 × 20	2,5–20	• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 9,52–15,87 % при добавлении 2,5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 1,59 % при добавлении 20 % отходов; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,65 увеличилась на 8–35 %; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,52 увеличилась на 2–7,6 % при добавлении 2,5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 4 % при добавлении 20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 3,17–26,98 %; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с соотношением 0,65 увеличилась на 3,33–13,33 % при добавлении 2,5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 6,67 % при добавлении 20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,52 увеличилась на 1,25–3,75 % при добавлении 2,5–5 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 1,25–5 % при добавлении 10–20 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси с водоцементным соотношением 0,95 и 0,65 уменьшилась на 4,17–11,67 % с соотношением 0,52 — на 3,33–13,33 % • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.95 increased by 9.52–15.87 % with the addition of 2.5–10 % recycled HDPE and decreased by 1.59 % with the addition of 20 % recycled HDPE; • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.65 increased by 8.00–35.00 %; • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.52 increased by 2.00–7.60 % with the addition of 2.5–10 % recycled HDPE and decreased by 4.00 % with the addition of 20 % recycled HDPE; • the splitting tensile strength of concrete with a water–cement ratio of 0.95 increased by 3.17–26.98 %; • the splitting tensile strength of concrete with a water–cement ratio of 0.65 increased by 3.33–13.33 % with the addition of 2.5–10 % recycled HDPE and decreased by 6.67 % with the addition of 20 % recycled HDPE; • the splitting tensile strength of concrete with a water–cement ratio of 0.52 increased by 1.25–3.75 % with the addition of 2.5–5 % recycled HDPE and decreased by 1.25–5.00 % with the addition of 10–20 % recycled HDPE; • the slump of concrete mixes with water–cement ratios of 0.95 and 0.65 decreased by 4.17–11.67 %, while that of the mix with a water–cement ratio of 0.52 decreased by 3.33–13.33 %	J.N. Tamrin [53] J.N. Tamrin [53]

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
10 × 10	2,5–20	• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 3,17 % при добавлении 2,5–5 % вторичного ПЭВП, уменьшилась на 6,35–17,46 % при добавлении 10–20 % отходов; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,65 увеличилась на 2–14 %, с соотношением 0,52 увеличилась на 0,4 % при добавлении 2,5–5 % вторичного ПЭВП, уменьшилась на 3,6–11,2 % при добавлении 10–20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 7,94–19,05 %, с соотношением 0,65 — на 6,67–30 %, с соотношением 0,52 — увеличилась на 2,5 % при добавлении 5 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 1,25–10 % при добавлении 2,5 % и 10–20 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси с водоцементным соотношением 0,95 уменьшилась на 0,83–8,33 %, с соотношением 0,65 — на 0,83–9,17 %, с соотношением 0,52 — на 2,5–10 % • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.95 increased by 3.17 % with the addition of 2.5–5 % recycled HDPE and decreased by 6.35–17.46 % with the addition of 10–20 % recycled HDPE; • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.65 increased by 2.00–14.00 %. In concrete with a water–cement ratio of 0.52, compressive strength increased by 0.40 % with the addition of 2.5–5 % recycled HDPE and decreased by 3.60–11.20 % with the addition of 10–20 % recycled HDPE; • the splitting tensile strength of concrete with a water–cement ratio of 0.95 increased by 7.94–19.05 %, while that of concrete with a water–cement ratio of 0.65 increased by 6.67–30.00 %. In concrete with a water–cement ratio of 0.52, splitting tensile strength increased by 2.50 % with the addition of 5 % recycled HDPE and decreased by 1.25–10.00 % with the addition of 2.5 % and 10–20 % recycled HDPE; • the slump of concrete mixes with water–cement ratios of 0.95, 0.65, and 0.52 decreased by 0.83–8.33 %, 0.83–9.17 %, and 2.50–10.00 %, respectively	J.N. Tamrin [53] J.N. Tamrin [53]
2,5 × 40		• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 1,59–14,29 % при добавлении 2,5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 12,7 % при добавлении 20 % отходов; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,65 увеличилась на 3–20 %, с соотношением 0,52 увеличилась на 2–3,2 % при добавлении 2,5–5 % ПЭВП и уменьшилась на 1,2–8 % при добавлении 10–20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 6,35–11,11% при добавлении 2,5–5 % ПЭВП и уменьшилась на 1,59–4,76 % при добавлении 10–20 % отходов • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.95 increased by 1.59–14.29 % with the addition of 2.5–10 % recycled HDPE and decreased by 12.70 % with the addition of 20 % recycled HDPE; • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.65 increased by 3.00–20.00 %. In concrete with a water–cement ratio of 0.52, compressive strength increased by 2.00–3.20 % with the addition of 2.5–5 % recycled HDPE and decreased by 1.20–8.00 % with the addition of 10–20 % recycled HDPE; • the splitting tensile strength of concrete with a water–cement ratio of 0.95 increased by 6.35–11.11 % with the addition of 2.5–5 % recycled HDPE and decreased by 1.59–4.76 % with the addition of 10–20 % recycled HDPE	

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 21. Выпуск 6, 2026
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 21. Issue 6, 2026

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
2,5 × 40	2,5–20	• прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,65 увеличилась на 3,33 % при добавлении 5 % и уменьшилась на 6,67–10 % при добавлении 2,5 и 10–20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,52 увеличилась на 1,25 % при добавлении 5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 2,5–5 % при добавлении 2,5 и 20 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси с водоцементным соотношением 0,95 уменьшилась на 6,67–1,25 %, с соотношением 0,65 — на 3,33–15,83 %, с соотношением 0,52 увеличилась на 5 % при добавлении 2,5 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 8,33–16,67 % при добавлении 5–20 % отходов • the splitting tensile strength of concrete with a water–cement ratio of 0.65 increased by 3.33 % with the addition of 5 % recycled HDPE and decreased by 6.67–10.00 % with the addition of 2.5 and 10–20 % recycled HDPE; • the splitting tensile strength of concrete with a water–cement ratio of 0.52 increased by 1.25 % with the addition of 5–10 % recycled HDPE and decreased by 2.50–5.00 % with the addition of 2.5 and 20 % recycled HDPE; • the slump of concrete mixes with water–cement ratios of 0.95 and 0.65 decreased by 1.25–6.67 % and 3.33–15.83 %, respectively. In the concrete mix with a water–cement ratio of 0.52, slump increased by 5.00 % with the addition of 2.5 % recycled HDPE and decreased by 8.33–16.67 % with the addition of 5–20 % recycled HDPE	J.N. Tamrin [53] J.N. Tamrin [53]
≤27,5	2,5–10	• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,45 увеличилась на 2,47–19,14 %, с соотношением 0,4 увеличилась на 2,57–4,67 при добавлении 5–7,5 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 2,34 и 4,44 % при добавлении 2,5 и 10 % отходов соответственно; • прочность на изгиб бетона с водоцементным соотношением 0,45 уменьшилась на 7,5 % при добавлении 2,5 % вторичного ПЭВП и увеличилась на 2,92–49,79 % при добавлении 5–10 % отходов; • прочность на изгиб бетона с водоцементным соотношением 0,4 уменьшилась на 5,77 % при добавлении 2,5 % вторичного ПЭВП и увеличилась на 9,42–27,31 % при добавлении 5–10 % отходов • the compressive strength of concrete with a water–cement ratio of 0.45 increased by 2.47–19.14 %. In concrete with a water–cement ratio of 0.40, compressive strength increased by 2.57–4.67 % with the addition of 5–7.5 % recycled HDPE but decreased by 2.34 and 4.44 % with the addition of 2.5 and 10 % recycled HDPE, respectively; • the flexural strength of concrete with a water–cement ratio of 0.45 decreased by 7.50 % with the addition of 2.5 % recycled HDPE and increased by 2.92–49.79 % with the addition of 5–10 % recycled HDPE; • the flexural strength of concrete with a water–cement ratio of 0.40 decreased by 5.77 % with the addition of 2.5 % recycled HDPE and increased by 9.42–27.31 % with the addition of 5–10 % recycled HDPE	Y. Suvidha и соавт. [45] Y. Suvidha et al. [45]
3,75	10–34	• прочность на сжатие уменьшилась на 4,96–35,38 % • compressive strength decreased by 4.96–35.38 %	Y. Aocharoen и соавт. [54] Y. Aocharoen et al. [54]

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
–	5–30	• прочность на сжатие увеличилась на 6,13 % при добавлении 15 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 10,67–23,96 % при добавлении 5–10 % отходов и на 20,15–32,3 % при добавлении 20–30 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании уменьшилась на 14,58–36,44 %; • прочность на изгиб уменьшилась на 18,54–44,13 %; • водопоглощение уменьшилось на 22,67–80,64 %; • осадка конуса уменьшилась на 15,63–62,5 % • the compressive strength increased by 6.13 % with the addition of 15 % recycled HDPE. This value decreased by 10.67–23.96 % with the addition of 5–10 % waste, and by 20.15–32.3 % with the addition of 20–30 % waste; • the split tensile strength decreased by 14.58–36.44 %; • the flexural strength decreased by 18.54–44.13 %; • the water absorption decreased by 22.67–80.64 %; • the slump decreased by 15.63–62.5 %	V. Punitha и соавт. [48] Punitha V. et al. [48]
2–10	10–50	• прочность на сжатие уменьшилась на 22–82 %; • модуль упругости уменьшился на 19–47 %; • теплопроводность уменьшилась на 10–33 % • the compressive strength decreased by 22–82 %; • the elastic modulus decreased by 19–47 %; • the thermal conductivity decreased by 10–33 %	M.A. Al-Osta и соавт. [49] M.A. Al-Osta et al. [49]
0,5–2		• прочность на сжатие уменьшилась на 11–72 %; • модуль упругости уменьшился на 17–39 %; • теплопроводность уменьшилась на 10–26 % • the compressive strength decreased by 11–72 %; • the elastic modulus decreased by 17–39 %; • the thermal conductivity decreased by 10–26 %	
0,5–2; 2–10		• прочность на сжатие уменьшилась на 18–77 %; • модуль упругости уменьшился на 20–48 %; • теплопроводность уменьшилась на 8–21 % • the compressive strength decreased by 18–77 %; • the elastic modulus decreased by 20–48 %; • the thermal conductivity decreased by 8–21 %	
≤20	10–30	• прочность на сжатие уменьшилась на 19,69–40 %; • прочность на изгиб уменьшилась на 17,49–30,3 %; • водопоглощение увеличилось 7,33–11,34 %; • износостойкость увеличилась на 14,01–51,91 %; • осадка конуса увеличилась на 9,84 % при добавлении 10 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 5,36–15,18 % при добавлении 20–30 % отходов; • плотность бетонной смеси уменьшилась на 5,2–10,6 % • the compressive strength decreased by 19.69–40 %; • the flexural strength decreased by 17.49–30.3 %; • the water absorption increased by 7.33–11.34 %; • the wear resistance increased by 14.01–51.91 %; • the slump increased by 9.84 % with the addition of 10 % recycled HDPE. This feature decreased by 5.36–15.18 % when adding 20–30 % waste; • the density of the concrete mixture decreased by 5.2–10.6 %	M. Abu-Saleem и соавт. [38] M. Abu-Saleem et al. [38]

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
—	10–30	• прочность на сжатие увеличилась на 4,93 % при добавлении 10 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 15,13–32,57 % при добавлении 20–30 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 2,49 % при добавлении 30 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 1,49–27,36 % при добавлении 10–20 % отходов; • прочность на изгиб уменьшилась на 7,43–25,71 % • the compressive strength increased by 4.93 % with the addition of 10 % recycled HDPE. This value decreased by 15.13–32.57 % when adding 20–30 % waste; • the split tensile strength increased by 2.49 % with the addition of 30 % recycled HDPE. This feature decreased by 1.49–27.36 % when adding 10–20 % waste; • the flexural strength decreased by 7.43–25.71 %	M. Karthik и соавт. [39] M. Karthik et al. [39]
2–4	1–7	• прочность на сжатие уменьшилась на 2,73–9,98 %; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 1,17–2,92 % при добавлении 1–3 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 0,29–3,8 % при добавлении 5–7 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси уменьшилась на 5,6–12,39 % • the compressive strength decreased by 2.73–9.98 %; • the split tensile strength increased by 1.17–2.92 % with the addition of 1–3 % recycled HDPE. This value decreased by 0.29–3.8 % with the addition of 5–7 % waste; • the slump of the concrete mix decreased by 5.6–12.39 %	T. Liu и соавт. [50] T. Liu et al. [50]
2–4	1–15	• прочность на сжатие увеличилась на 0,29–4,33 % при добавлении 1–5 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 7,21–18,26 % при добавлении 7–15 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 2,63–7,02 % при добавлении 1–5 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 8,48–14,33 % при добавлении 7–15 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси уменьшилась на 6,58–12,36 % • the compressive strength increased by 0.29–4.33 % with the addition of 1–5 % recycled HDPE. This value decreased by 7.21–18.26 % when adding 7–15 % waste; • the split tensile strength increased by 2.63–7.02 % with the addition of 1–5 % recycled HDPE. This feature decreased by 8.48–14.33 % when adding 7–15 % waste; • the slump of the concrete mix decreased by 6.58–12.36 %	
≤10	10–30	• прочность на сжатие уменьшилась на 14–33 %; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 4–11 %; • прочность на изгиб увеличилась на 36–49 % • the compressive strength decreased by 14–33 %; • the split tensile strength increased by 4–11 %; • the flexural strength increased by 36–49 %	M.M. Radhi и соавт. [51] M.M. Radhi et al. [51]

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
–	1–5	• прочность на сжатие увеличилась на 3,19–22,9 % при добавлении 1–3 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 12,25–13,8 % при добавлении 4–5 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 17,34–84,6 % при добавлении 1–3 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 18,3–26,1 % при добавлении 4–5 % отходов; • прочность на изгиб увеличилась на 1,13–7,95 % при добавлении 1–3 % вторичного ПЭВП. Данный показатель уменьшился на 4,31–8,63 % при добавлении 4–5 % отходов • the compressive strength increased by 3.19–22.9 % with the addition of 1–3 % recycled HDPE. This feature decreased by 12.25–13.8 % with the addition of 4–5 % waste; • the split tensile strength increased by 17.34–84.6 % with the addition of 1–3 % recycled HDPE. This feature decreased by 18.3–26.1 % with the addition of 4–5 % waste; • the flexural strength increased by 1.13–7.95 % with the addition of 1–3 % recycled HDPE. This value decreased by 4.31–8.63 % with the addition of 4–5 % waste	T.M. Selvi и соавт. [52] T.M. Selvi et al. [52]
0,45 × 40	0,5–1	• прочность на сжатие уменьшилась на 13,35–18,78 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 9,15–14,38 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП; • осадка конуса бетонной смеси уменьшилась на 12–14 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП • the compressive strength decreased by 13.35–18.78 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE; • the split tensile strength increased by 9.15–14.38 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE; • the slump of the concrete mix decreased by 12–14 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE	J.K. Park и соавт. [42] J.K. Park et al. [42]
1,5 × 40		• прочность на сжатие уменьшилась на 5,7–15,30 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 20,26–32,03 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП; • осадка конуса бетонной смеси уменьшилась на 20,4–23,2 % при добавлении 0,5–1 % вторичного ПЭВП • the compressive strength decreased by 5.70–15.30 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE; • the split tensile strength increased by 20.26–32.03 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE; • the slump of the concrete mix decreased by 20.4–23.2 % with the addition of 0.5–1 % recycled HDPE	
0–3, 3–8	25–75	• увеличение количества ПЭВП в смеси привело к снижению плотности бетона. Максимальное снижение плотности — 46 % при добавлении 75 % отходов; • прочность на сжатие уменьшилась на 44,29–88,57 %; • модуль упругости уменьшился на 32,3–84,92 %; • теплопроводность уменьшилась на 20,97–57,53 % • increasing the amount of HDPE in the mixture led to a decrease in concrete density. The maximum density reduction was 46 with 75 % waste addition; • the compressive strength decreased by 44.29–88.57 %; • the elastic modulus decreased by 32.3–84.92 %; • the thermal conductivity decreased by 20.97–57.53 %	M. Belmokaddem и соавт. [41] M. Belmokaddem et al. [41]

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
5 × 20	2,5–20	• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 9,52–15,87 % при добавлении 2,5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 1,59 % при добавлении 20 % отходов; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,65 увеличилась на 8–35 %; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,52 увеличилась на 2–7,6 % при добавлении 2,5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 4 % при добавлении 20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 3,17–26,98 %; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с соотношением 0,65 увеличилась на 3,33–13,33 % при добавлении 2,5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 6,67 % при добавлении 20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,52 увеличилась на 1,25–3,75 % при добавлении 2,5–5 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 1,25–5 % при добавлении 10–20 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси с водоцементным соотношением 0,95 и 0,65 уменьшилась на 4,17–11,67 % с соотношением 0,52 — на 3,33–13,33 % • the compressive strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.95 increased by 9.52–15.87 % with the addition of 2.5–10 % recycled HDPE and decreased by 1.59 % with the addition of 20 % waste; • the compressive strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.65 increased by 8–35 %; • the compressive strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.52 increased by 2–7.6 % with the addition of 2.5–10 % recycled HDPE and decreased by 4 % with the addition of 20 % waste; • the split tensile strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.95 increased by 3.17–26.98 %; • the split tensile strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.65 increased by 3.33–13.33 % with the addition of 2.5–10 % recycled HDPE and decreased by 6.67 % with the addition of 20 % waste; • the split tensile strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.52 increased by 1.25–3.75 % with the addition of 2.5–5 % recycled HDPE and decreased by 1.25–5 % with the addition of 10–20 % waste; • the slump of the concrete mix with water-cement ratios of 0.95 and 0.65 decreased by 4.17–11.67 %, and with a ratio of 0.52 by 3.33–13.33 %	J.N. Tamrin [53] J.N. Tamrin [53]

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
10 × 10	2,5–20	• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 3,17 % при добавлении 2,5–5 % вторичного ПЭВП, уменьшилась на 6,35–17,46 % при добавлении 10–20 % отходов; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,65 увеличилась на 2–14 %, с соотношением 0,52 увеличилась на 0,4 % при добавлении 2,5–5 % вторичного ПЭВП, уменьшилась на 3,6–11,2 % при добавлении 10–20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 7,94–19,05 %, с соотношением 0,65 — на 6,67–30 %, с соотношением 0,52 — увеличилась на 2,5 % при добавлении 5 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 1,25–10 % при добавлении 2,5 % и 10–20 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси с водоцементным соотношением 0,95 уменьшилась на 0,83–8,33 %, с соотношением 0,65 — на 0,83–9,17 %, с соотношением 0,52 — на 2,5–10 % • the compressive strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.95 increased by 3.17 % with the addition of 2.5–5 % recycled HDPE, and decreased by 6.35–17.46 % with the addition of 10–20 % waste; • the compressive strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.65 increased by 2–14 %, and with a ratio of 0.52 increased by 0.4 % with the addition of 2.5–5 % recycled HDPE, decreased by 3.6–11.2 % with the addition of 10–20 % waste; • the split tensile strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.95 increased by 7.94–19.05 %, with a ratio of 0.65 by 6.67–30 %, and with a ratio of 0.52 increased by 2.5 with 5 % recycled HDPE and decreased by 1.25–10 % with the addition of 2.5 and 10–20 % waste; • the slump of the concrete mix with a water-cement ratio of 0.95 decreased by 0.83–8.33 %, with a ratio of 0.65 by 0.83–9.17 %, and with a ratio of 0.52 by 2.5–10 %	J.N. Tamrin [53] J.N. Tamrin [53]
2,5 × 40		• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 1,59–14,29 % при добавлении 2,5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 12,7 % при добавлении 20 % отходов; • прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,65 увеличилась на 3–20 %, с соотношением 0,52 увеличилась на 2–3,2 % при добавлении 2,5–5 % ПЭВП и уменьшилась на 1,2–8 % при добавлении 10–20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,95 увеличилась на 6,35–11,11% при добавлении 2,5–5 % ПЭВП и уменьшилась на 1,59–4,76 % при добавлении 10–20 % отходов • the compressive strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.95 increased by 1.59–14.29 % with the addition of 2.5–10 % recycled HDPE and decreased by 12.7 % with the addition of 20 % waste; • the compressive strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.65 increased by 3–20 %, and with a ratio of 0.52 increased by 2–3.2 % when adding 2.5–5 % HDPE and decreased by 1.2–8 % when adding 10–20 % waste; • the split tensile strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.95 increased by 6.35–11.11 with 2.5–5 % HDPE added and decreased by 1.59–4.76 with 10–20 % waste added	

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 21. Выпуск 6, 2026
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 21. Issue 6, 2026

Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
2,5 × 40	2,5–20	• прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,65 увеличилась на 3,33 % при добавлении 5 % и уменьшилась на 6,67–10 % при добавлении 2,5 и 10–20 % отходов; • прочность на растяжение при раскалывании бетона с водоцементным соотношением 0,52 увеличилась на 1,25 % при добавлении 5–10 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 2,5–5 % при добавлении 2,5 и 20 % отходов; • осадка конуса бетонной смеси с водоцементным соотношением 0,95 уменьшилась на 6,67–1,25 %, с соотношением 0,65 — на 3,33–15,83 %, с соотношением 0,52 увеличилась на 5 % при добавлении 2,5 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 8,33–16,67 % при добавлении 5–20 % отходов • the split tensile strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.65 increased by 3.33 at 5 % addition and decreased by 6.67–10 at 2.5 % and 10–20 % waste additions; • the split tensile strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.52 increased by 1.25 at 5–10 % recycled HDPE and decreased by 2.5–5 % at 2.5 and 20 % waste additions; • the slump of the concrete mix with a water-cement ratio of 0.95 decreased by 6.67–1.25 %, with 0.65 decreased by 3.33–15.83 %, and with 0.52 increased by 5 with 2.5 % recycled HDPE addition and decreased by 8.33–16.67 with 5–20 % waste additions	J.N. Tamrin [53] J.N. Tamrin [53]
≤27,5	2,5–10	• прочность на сжатие бетона с водоцементным соотношением 0,45 увеличилась на 2,47–19,14 %, с соотношением 0,4 увеличилась на 2,57–4,67 при добавлении 5–7,5 % вторичного ПЭВП и уменьшилась на 2,34 и 4,44 % при добавлении 2,5 и 10 % отходов соответственно; • прочность на изгиб бетона с водоцементным соотношением 0,45 уменьшилась на 7,5 % при добавлении 2,5 % вторичного ПЭВП и увеличилась на 2,92–49,79 % при добавлении 5–10 % отходов; • прочность на изгиб бетона с водоцементным соотношением 0,4 уменьшилась на 5,77 % при добавлении 2,5 % вторичного ПЭВП и увеличилась на 9,42–27,31 % при добавлении 5–10 % отходов • the compressive strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.45 increased by 2.47–19.14 %, and with a ratio of 0.4 increased by 2.57–4.67 % when adding 5–7.5 % recycled HDPE, but decreased by 2.34 and 4.44 % when adding 2.5 and 10 % waste, respectively; • the flexural strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.45 decreased by 7.5 % with the addition of 2.5 % recycled HDPE and increased by 2.92–49.79 % when adding 5–10 % waste; • the flexural strength of the concrete with a water-cement ratio of 0.4 decreased by 5.77 with 2.5 % recycled HDPE and increased by 9.42–27.31 % when adding 5–10 % waste	Y. Suvidha и соавт. [45] Y. Suvidha et al. [45]
3,75	10–34	• прочность на сжатие уменьшилась на 4,96–35,38 % • the compressive strength decreased by 4.96–35.38 %	Y. Aocharoen и соавт. [54] Y. Aocharoen et al. [54]

Табл. 3. Свойства бетона, содержащего смесь различных полимерных отходов

Table 3. Properties of concrete containing a mixture of various polymer wastes

Полимеры Polymers	Размер частиц, мм Particle size, mm	Содержание отходов, % Waste content, %	Полученные свойства Resulting properties	Литературный источник Source
ПЭТ и ПЭВП PET and HDPE	3,75; 27,50	30–34 ПЭВП + 5 ПЭТ 30–34 HDPE + 5 PET	• прочность на сжатие уменьшилась на 26,32–45,13 % • compressive strength decreased by 26.32–45.13 %	Y. Aocharoen и соавт. [54] Y. Aocharoen et al. [54]
ПЭТ и ПЭ PET and PE	1 × 10	0,25–1 ПЭТ + 0,25–1 ПЭ 0.25–1 PET + 0.25–1 PE	• прочность на сжатие уменьшилась на 6,52–45,65 %; • прочность на растяжение при раскалывании увеличилась на 12,05 % при добавлении 0,25 % ПЭТ и 0,5 % ПЭ и уменьшилась на 13,32–38,69 % при остальных соотношениях смеси вторичных полимеров; • прочность на изгиб увеличилась на 10 % при добавлении 0,25 % ПЭТ и 0,5 % ПЭ и уменьшилась на 8–36 % при остальных соотношениях смеси вторичных полимеров • compressive strength decreased by 6.52–45.65 %; • splitting tensile strength increased by 12.05 % with the addition of 0.25 % PET and 0.5 % PE, but decreased by 13.32–38.69 % with other secondary polymer mixture ratios; • flexural strength increased by 10.00 % with the addition of 0.25 % PET and 0.5 % PE, but decreased by 8.00–36.00 % with other secondary polymer mixture ratios	S. Duraiswamy и соавт. [55] S. Duraiswamy et al. [55]
ПЭТ, ПЭВП и ПП PET, HDPE and PP	≤13,2	5–10 ПЭТ + 5–10 ПЭВП; 5–10 ПЭТ + 5–10 ПП; 5–10 ПЭВП + 5–10 ПП; 5–10 ПЭТ + 5–10 ПЭВП + + 5–10 ПП 5–10 PET + 5–10 HDPE; 5–10 PET + 5–10 PP; 5–10 HDPE + 5–10 PP; 5–10 PET + 5–10 HDPE + + 5–10 PP	• водопоглощение уменьшилось на 1,23 и 0,37 % при добавлении 5 % ПЭТ с 5 % ПЭВП и 5 % ПЭТ с 5 % ПП, в остальных случаях увеличилось на 0,98–9,69 %; • ударная вязкость увеличилась на 180–450 %; • прочность на сжатие уменьшилась на 17,95–40,29 % при добавлении 5–10 % сразу всех видов вторичных полимеров; • прочность на растяжение при раскалывании уменьшилась на 16,79–37,96 % при добавлении 5–10 % сразу всех видов вторичных полимеров • water absorption decreased by 1.23 % and 0.37 % with the addition of 5 % PET + 5 % HDPE and 5 % PET + 5 % PP, respectively, but increased by 0.98–9.69 % in the other cases; • impact strength increased by 180–450 %; • compressive strength decreased by 17.95–40.29 % when 5–10 % of all types of recycled polymers were added simultaneously; • splitting tensile strength decreased by 16.79–37.96 % when 5–10 % of all types of recycled polymers were added simultaneously	M. Abu-Saleem и соавт. [56] M. Abu-Saleem et al. [56]

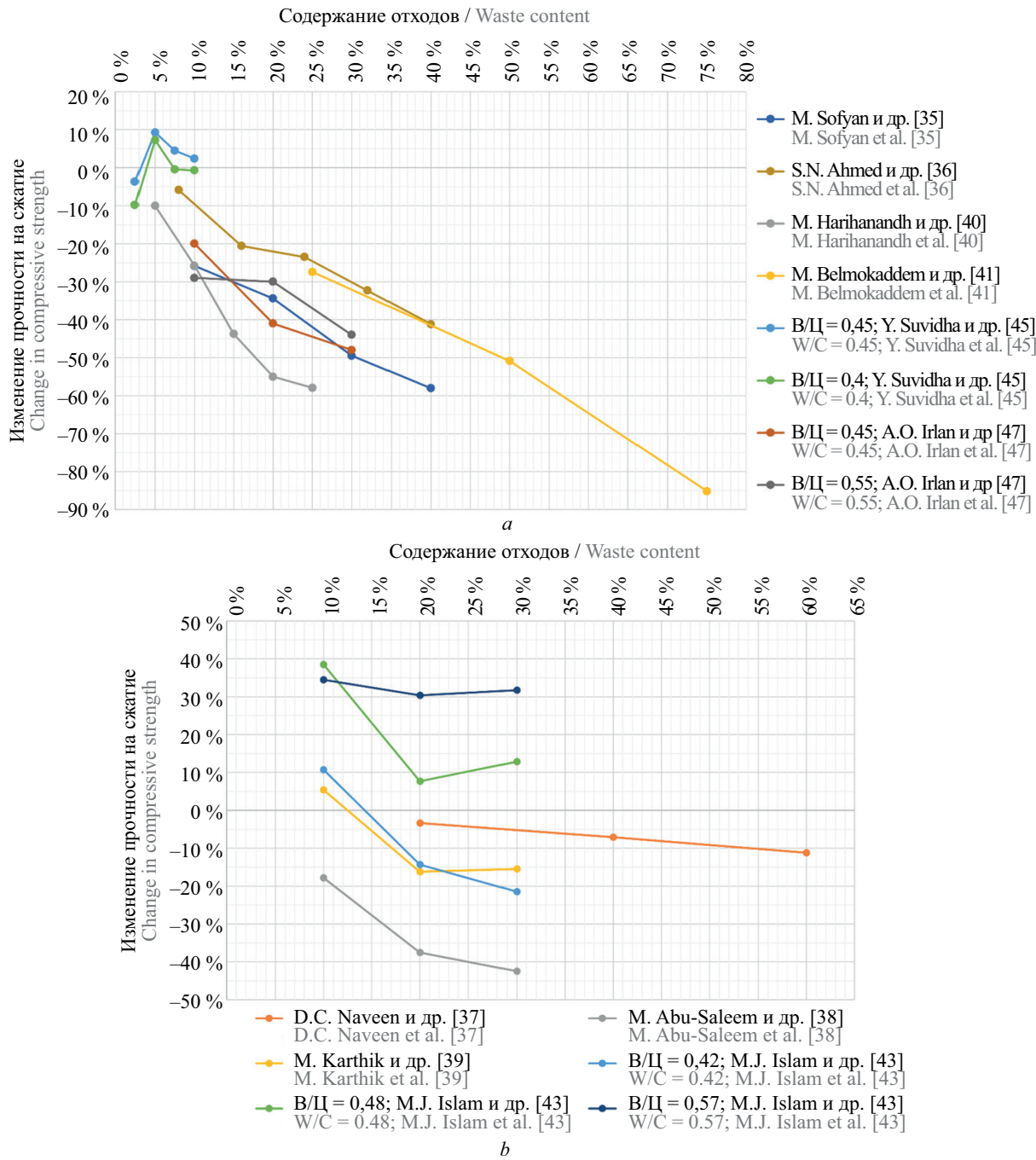


Рис. 3. Изменение прочности на сжатие с увеличением содержания ПП: *a* — в мелком заполнителе; *b* — в крупном заполнителе

Fig. 3. Changes in compressive strength with increasing PP content: *a* — in fine aggregate; *b* — in coarse aggregate

о том, что при увеличении количества вторичного ПП в бетоне прочность на сжатие в основном уменьшается. Изменение прочности при замене части мелкого заполнителя вторичным ПП происходит в диапазоне от +9,28 % при 5%-ной замене и до -85,14 % при 75%-ной замене, а при замене части крупного от +38,46 % при 10%-ной замене до -42,5 % при 30%-ной замене (рис. 3).

По графикам изменения прочностных характеристик были определены их средние значения

при различных уровнях содержания вторичного ПП в качестве крупного и мелкого заполнителя (табл. 4). В случаях снижения прочности значения изменений соответствующих показателей представлены со знаком «-».

Согласно табл. 4, практически все средние значения изменения прочности при замене вторичным ПП крупного заполнителя оказались выше аналогичных значений при замене мелкого заполнителя. При этом оптимальным процентным содержанием

Табл. 4. Средние значения изменения прочностных характеристик бетона с использованием вторичного ПП
Table 4. Mean changes in the strength properties of concrete incorporating recycled PP

Содержание ПП, % PP content, %	Среднее изменение прочности, % Average changes in strength, %						Среднее из- менение всех характери- стик, % Average changes of all character- istics, %
	на сжатие compressive strength		на растяжение при раскалывании tensile strength		на изгиб flexural strength		
	Мелкий заполнитель Fine aggregate	Крупный заполнитель Coarse aggregate	Мелкий заполнитель Fine aggregate	Крупный заполнитель Coarse aggregate	Мелкий заполнитель Fine aggregate	Крупный заполнитель Coarse aggregate	
5	2,2	–	–4,5	–	4,5	–	0,7
10	–20,3	14,3	–5,4	–10,3	–21,9	–14,9	–9,8
15	–30,3	4,1	–13,0	–7,1	–40,3	–20,3	–17,8
20	–36,0	–5,6	–18,6	–3,9	–50,7	–25,6	–23,4
25	–39,9	–2,6	–23,5	–10,7	–53,3	–23,3	–25,5
30	–43,1	–6,7	–16,9	–17,3	–	–20,5	–20,8
35	–42,0	–6,5	–31,5	–12,0	–	–	–23,0
40	–46,8	–7,1	–45,9	–14,2	–	–	–28,5
45	–46,0	–7,5	–	–16,5	–	–	–21,6
50	–50,9	–9,5	–	–18,5	–	–	–24,3
55	–57,5	–10,0	–	–20,5	–	–	–27,1
60	–64,5	–11,2	–	–22,7	–	–	–30,3
65	–71,5	–	–	–	–	–	–71,5
70	–78,0	–	–	–	–	–	–78,0
75	–85,1	–	–	–	–	–	–85,1

с учетом среднего изменения по всем прочностным характеристикам, указанным в табл. 4, является диапазон от 5 до 15 %. Дальнейшее увеличение количества полимерных отходов данного вида в бетоне приводит к значительному снижению его прочно-сти.

На рис. 4 представлены графики, отражающие изменение прочности на сжатие бетона, содержаще-го отходы из ПЭВП в качестве мелкого и крупного заполнителя соответственно.

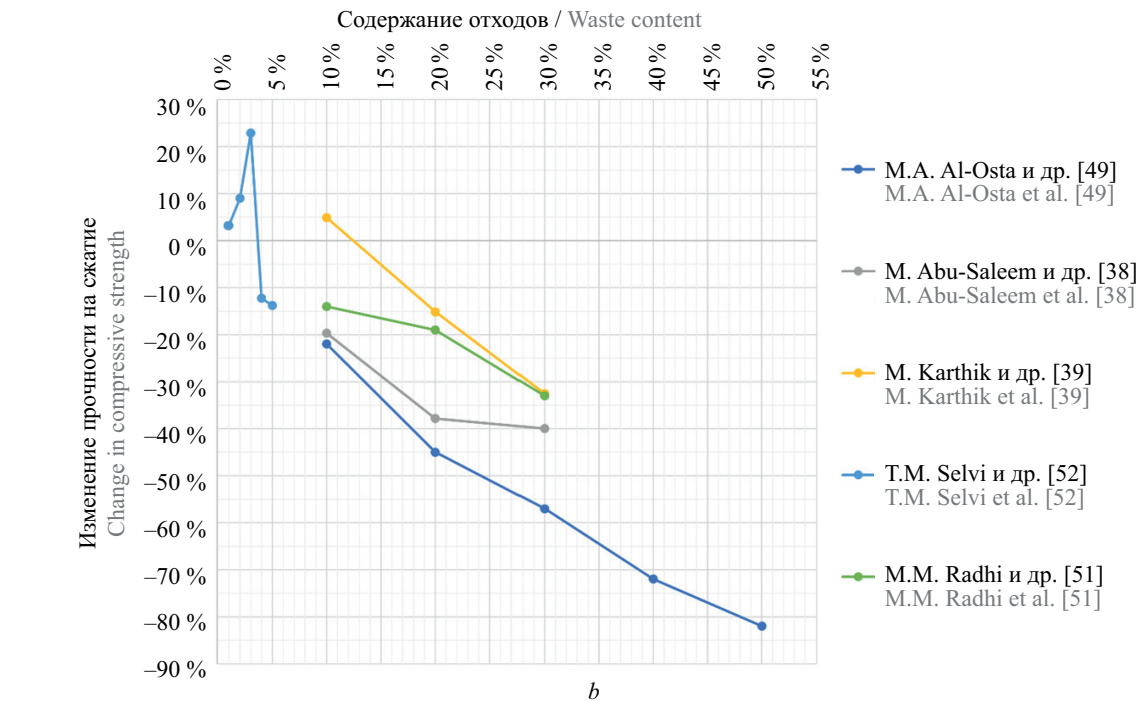
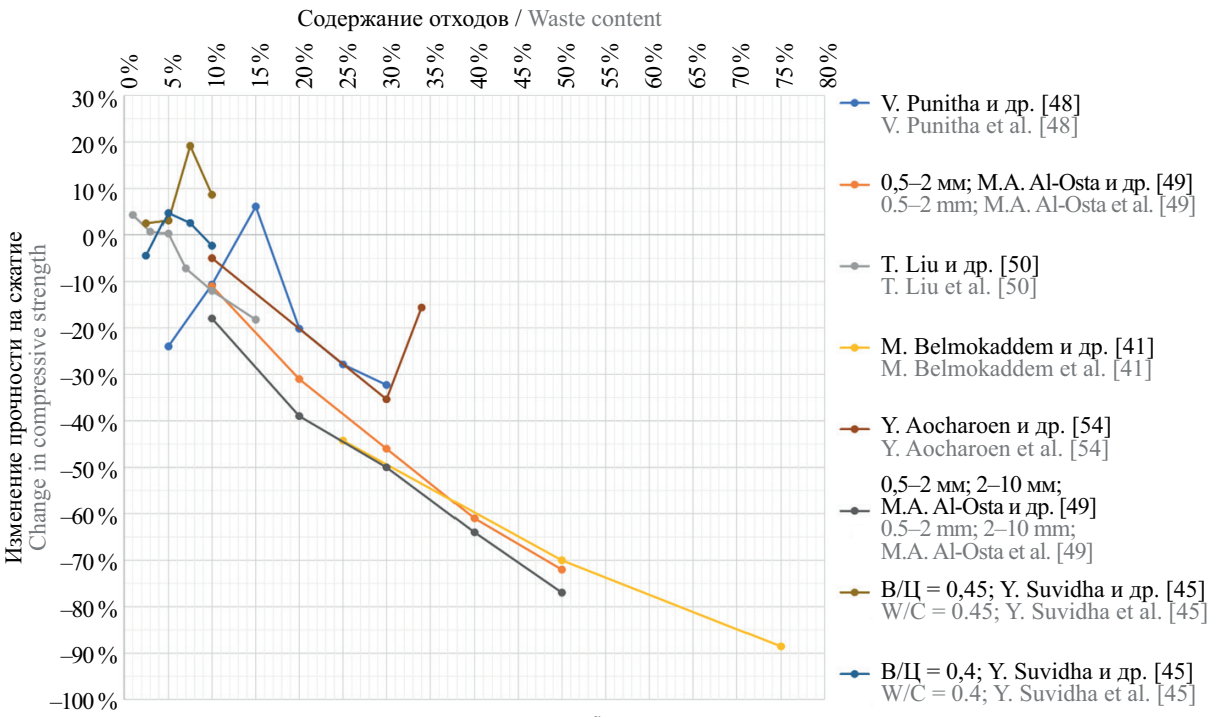
Прочность на сжатие при увеличении содер-жания отходов из ПЭВП имеет общую тенденцию к уменьшению при использовании их как в качестве крупного, так и мелкого заполнителя. Изменение этого показателя при замене части мелкого запол-нителя вторичным ПЭВП происходит в диапазоне от +19,14 % при 7,5%-ной замене и до –88,57 % при 75%-ной замене (рис. 4, а), а при замене части крупного — от +35 % при 5%-ной замене (рис. 4, с) до –82 % при 50%-ной замене (рис. 4, б).

Средние значения изменения прочностных характеристик при различных уровнях содержания вторичного ПЭВП в качестве крупного и мелкого заполнителя, определенные с помощью графиков, представлены в табл. 5. Аналогично табл. 4 уменьшение показателей обозначено знаком «-».

При замене крупного заполнителя вторичным ПЭВП большинство средних изменений показателей прочности оказались выше, чем при замене мелкого заполнителя. Оптимальным процентным содержанием, учитывая среднее изменение по всем

прочностным характеристикам, указанным в табл. 5, является диапазон от 5 до 20 %. При дальнейшем увеличении количества полимерных отходов данного вида в бетоне происходит значительное снижение его прочности.

Таким образом, добавление отходов ПП и ПЭВП как в виде мелкого, так и крупного заполнителя в большинстве случаев приводит к устойчивой тенденции снижения прочности на сжатие, на растяжение при раскалывании и на изгиб. Причиной этого явления может служить недостаточная адгезия меж-



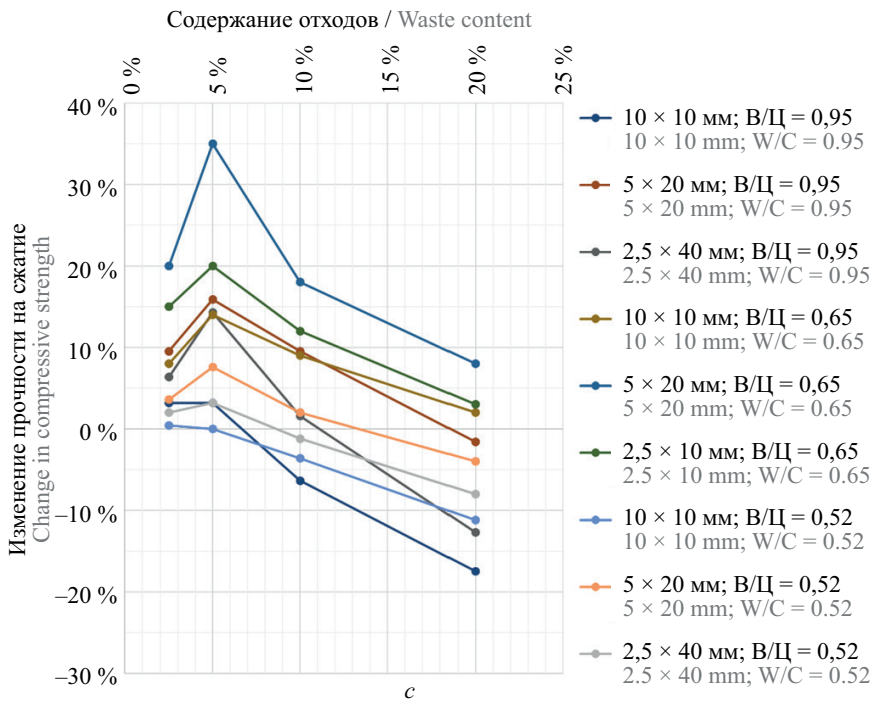


Рис. 4. Изменение прочности на сжатие при увеличении содержания ПЭВП: *a* — в мелком заполнителе; *b* — в крупном заполнителе; *c* — в крупном заполнителе, по данным из исследования J.N. Tamrin [53]

Fig. 4. Changes in compressive strength with increasing HDPE content: *a* — in fine aggregate; *b* — in coarse aggregate; *c* — in coarse aggregate, based on data from J.N. Tamrin [53]

Табл. 5. Средние значения изменения прочностных характеристик бетона с использованием вторичного ПЭВП

Table 5. Mean changes in the strength properties of concrete incorporating recycled HDPE

Содержание ПЭВП, % HDPE content, %	Среднее изменение прочности, % Average changes in strength, %						Среднее изме- нение всех ха- рактеристик, % Average changes of all character- istics, %
	на сжатие compressive strength		на растяжение при раскалывании tensile strength		на изгиб flexural strength		
	Мелкий заполнитель Fine aggregate	Крупный заполнитель Coarse aggregate	Мелкий заполнитель Fine aggregate	Крупный заполнитель Coarse aggregate	Мелкий заполнитель Fine aggregate	Крупный заполнитель Coarse aggregate	
5	–4,0	12,5	–4,2	6,1	–2,1	–8,6	–0,1
10	–8,4	–0,7	–15,9	1,6	–2,0	3,69	–3,6
15	–14,7	–6,5	–18,8	1,6	–31,6	1,33	–11,4
20	–27,5	–12,2	–30,3	0,5	–35,0	–0,7	–17,5
25	–36,4	–35,0	–33,5	5,3	–38,4	–1,2	–23,2
30	–42,5	–40,9	–36,4	6,7	–44,1	–2,3	–26,6
35	–55,2	–64,5	–	–	–	–	–59,9
40	–61,7	–72,0	–	–	–	–	–66,9
45	–67,5	–77,0	–	–	–	–	–72,3
50	–73,0	–82	–	–	–	–	–77,5
55	–74,0	–	–	–	–	–	–74,0
60	–77,5	–	–	–	–	–	–77,5
65	–81,5	–	–	–	–	–	–81,5
70	–85,0	–	–	–	–	–	–85,0
75	–88,6	–	–	–	–	–	–88,6

ду пластиковыми заполнителями и вяжущими компонентами, а также низкая прочность, модуль упругости и жесткость вторичных материалов по сравнению с природными [20, 60, 61].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ научных публикаций, посвященных использованию пластиковых отходов в производстве бетонных изделий, свидетельствует о значительном потенциале данной тематики. Переработка и использование отходов полимеров для изготовления строительных материалов помогают уменьшить потребление природных ресурсов, а также могут снизить затраты на транспортировку и себестоимость готовой продукции. Наиболее целесообразным является рециклинг вторичных ПП и ПЭВП, так как они широко распространены и легко поддаются переработке. Добавление отходов этого вида в качестве заполнителя в состав бетонной смеси в большинстве случаев приводит к ухудшению прочностных характеристик получаемого материала при увеличении количества вторичных полимеров. Однако в отдельных случаях прочность бетона с пластиковыми отходами может превышать

показатели контрольных образцов, в которых используются природные заполнители. При этом замещение крупного заполнителя на вторичные ПП и ПЭВП оказывает более значительное влияние на повышение прочности бетона по сравнению с заменой мелких заполнителей. Сравнительный анализ средних изменений показателей прочности также продемонстрировал, что введение полимерных отходов в состав крупного заполнителя приводит к меньшему снижению прочности бетона по сравнению с их добавлением в мелкий заполнитель. Следует отметить, что при содержании вторичного ПП и ПЭВП в количестве более 20 % наблюдается существенное ухудшение прочностных характеристик композиционного материала.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод об актуальности дальнейшего изучения свойств бетона с замещением крупного заполнителя смесью отходов ПП и ПЭВП в диапазоне от 5 до 20. Ключевым аспектом является установление оптимальных пропорций вторичных полимеров, а также определение параметров технологического процесса производства данного композиционного материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чалов К.В., Лагушева Е.И., Луговой Ю.В., Дольда В.Ю. Метод утилизации полимерных отходов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2024. № 4 (24). С. 100–106. DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-100-106. EDN ARQFUU.

2. Fayshal M.A. Current practices of plastic waste management, environmental impacts, and potential alternatives for reducing pollution and improving management // Heliyon. 2024. Vol. 10. Issue 23. P. e40838. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40838. EDN NHHOCQ.

3. Abahussain A.A.M., Nasr F.A., Jumah A.B., Saravanan P., Siva Kumar N., Al-zharani M. et al. Toxic threats from plastic waste: human health impacts, challenges, and policy solutions // RSC Advances. 2025. Vol. 15. Issue 48. Pp. 40761–40788. DOI: 10.1039/d5ra05845g. EDN TSIVXY.

4. Qian K., Wang Lu., Teng J., Liu G. Strategies and technologies for sustainable plastic waste treatment and recycling // Environmental Functional Materials. 2025. DOI: 10.1016/j.efmat.2025.01.004. EDN XFRQSN.

5. Тансыккужина И.И. Эколого-экономические аспекты рециклинга полимерных материалов // Вестник молодого ученого УГНТУ. 2025. № 4 (32). С. 90–94. EDN FXIUPE.

6. Белецкий Я.О., Сердюк А.И. Рациональные методы переработки пластиковых отходов // Вестник Донбасской национальной академии строитель-

ства и архитектуры. 2023. № 5 (163). С. 37–43. EDN WQYRBK.

7. Кооп К.В. Механический рециклинг пластиковых отходов для изготовления тротуарного покрытия в жилых массивах поселка Аршалы Акмолинской области // Экологические проблемы в колледжах и школах: опыт проведения зеленых мероприятий : сб. мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 75–79. EDN OCZCPF.

8. Ухарцева И.Ю., Цветкова Е.А., Гольдаде В.А., Шановалов В.М. Утилизация упаковочных материалов как основа экологической безопасности: традиционные материалы // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. 2021. Т. 11. № 2. С. 60–71. EDN SQQUFC.

9. Муминова О.А., Колесникова Л.А. Способы переработки полимерных отходов // Новые материалы и технологии для устойчивого развития : мат. III Междунар. науч. конф. 2024. С. 138–140. EDN GKYNOT.

10. Салихова Э.В., Сайфулин Р.М., Мурузина Е.В. Использование вторичного полимерного сырья при производстве строительных материалов // Развитие современной науки и технологий в условиях трансформационных процессов : сб. мат. XVII Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 90–86. EDN ULYMVN.

11. Малютина М.С., Сергеева А.А. Современные технологии переработки полимерных отходов

и проблемы их использования // Будущее науки: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества : сб. науч. ст. 2-й Всеросс. молодежной науч. конф. 2024. С. 146–149. EDN QONIQO.

12. Ланицкий С.А. Сравнительный анализ различных технологий переработки пластиковых отходов // Интеллектуальный потенциал молодых ученых как драйвер развития АПК : мат. Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и обучающихся. 2024. С. 270–273. EDN DXWZMA.

13. Ухарцева И.Ю., Бобрышева С.Н., Селюков И.В. Проблемы утилизации бытовых полимерных отходов: технология и экология. Часть 1. Рециклинг и биодegradация (обзор) // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2024. № 4 (99). С. 28–42. DOI: 10.62595/1819-5245-2024-4-28-42. EDN KGOSED.

14. Ишин Л.А. Экологическое содержание перспектив утилизации полимеров: реализуемые и перспективные проекты // Вестник Южно-Российского государственного технического университета (НПИ). Серия: Социально-экономические науки. 2024. Т. 17. № 4. С. 182–193. DOI: 10.17213/2075-2067-2024-4-182-193. EDN ZFBJQU.

15. Виноградова Е.В., Мурзина О.Г., Тангиев А.М. Перспективы использования пластиковых отходов в строительстве // Инженерный вестник Дона. 2020. № 10 (70). С. 270–266. EDN ZTAADK.

16. Борович Я.П. Различные методы переработки полимерных отходов и их применение в строительстве // Наука сегодня: технические и естественные науки : сб. мат. XXXVI Междунар. очно-заочной науч.-практ. конф. 2023. С. 101–104. EDN KJTWQJ.

17. Ajith A., Swapna M.S., Sankararaman S. Clay-plastic-biodegradable waste composite as low carbon construction material: A way to sustainable development // Construction and Building Materials. 2025. Vol. 488. P. 142151. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142151. EDN AFGJFL.

18. Magbool H.M. Sustainability of utilizing recycled plastic fiber in green concrete : a systematic review // Case Studies in Construction Materials. 2025. Vol. 22. P. e04432. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04432. EDN IWNSJU.

19. Saha S., Sau D., Hazra T. Economic viability analysis of recycling waste plastic as aggregates in green sustainable concrete // Waste Management. 2023. Vol. 169. Pp. 289–300. DOI: 10.1016/j.wasman.2023.07.023. EDN ATRRPZ.

20. Баруздин А.А., Закревская Л.В. Перспективы применения отходов полимеров в качестве заполнителей бетона // Техника и технология силикатов. 2024. Т. 31. № 3. С. 247–261. DOI: 10.62980/2076-0655-2024-247-261. EDN AYFQSM.

21. Jain A., Siddique S., Gupta T., Sharma R.K., Chaudhary S. Utilization of shredded waste plastic bags to improve impact and abrasion resistance of con-

crete // Environment, Development and Sustainability. 2020. Vol. 22. Issue 1. Pp. 337–362. DOI: 10.1007/s10668-018-0204-1. EDN GYOAWD.

22. Pasha M.Sh., Aslam M.F., Hamza M., Ali N.M., Jabbar I., Ahmed S., Abbasi H.K.Ja. Sustainable construction: Performance analysis of concrete incorporating E-waste plastic aggregates and silica fume // Construction and Building Materials. 2025. Vol. 474. P. 141103. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141103. EDN CJUYAK.

23. Attia M.M., Elsadany R.A., Khalil M.H., Ahmed M., Baktheer A., Shawky Sh.M.M. Physical and mechanical properties of concrete containing plastic tube fibers // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 21. P. e03809. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03809. EDN KMOKWF.

24. Soharu A., Naveen B.P., Vaid K. Influence of using waste plastic as coarse aggregates-based sustainable concrete // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Waste and Resource Management. 2026. Vol. 179. Issue 1. Pp. 45–54. DOI: 10.1680/jwarm.25.00017

25. Guo Y.Ch., Li X.Mi., Zhang J., Lin J.X. A review on the influence of recycled plastic aggregate on the engineering properties of concrete // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 79. P. 107787. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.107787. EDN EEGPUG.

26. Баруздин А.А., Шаронов Д.И., Прохоров С.В. Рециклинг полимерных отходов // Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование : сб. мат. III Междунар. науч.-практ. конф. 2025. С. 206–208. EDN HBFTBD.

27. Ковалев К.Ю., Монастырский Д.И. Использование переработанного пластика бутылок в строительстве // Современные проблемы экологии и промышленной безопасности : мат. IV Всеросс. науч.-техн. конф. 2025. С. 36–38. EDN TZORGG.

28. Альобаиди Д.А., Худяков А.В. Применение пластиковых отходов в качестве мелкого заполнителя в бетоне // Взгляд молодых на проблемы региональной экономики – 2018 : мат. Всеросс. открытого конкурса студентов вузов и молодых исследователей. 2018. С. 137–140. EDN YOJLED.

29. Hamada H.M., Al-Attar A., Abed F., Beddu S., Humada A.M., Majdi A. et al. Enhancing sustainability in concrete construction: A comprehensive review of plastic waste as an aggregate material // Sustainable Materials and Technologies. 2024. Vol. 40. P. e00877. DOI: 10.1016/j.susmat.2024.e00877. EDN ESWEUC.

30. Almohana A.I., Abdulwahid M.Ya., Galobardes I., Mushtaq Ja., Almojil S.F. Producing sustainable concrete with plastic waste : a review // Environmental Challenges. 2022. Vol. 9. P. 100626. DOI: 10.1016/j.envc.2022.100626. EDN HOYMHJ.

31. Проскурнин А.М., Жужома К.И., Афанасьев А.П. Использование пластиковых отходов в качестве строительных материалов // Актуальные вопросы современной науки и инноватики : сб. науч. ст. по мат.

I Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 290–294. EDN CHBTHG.

32. Сиков Н.Е., Серёгин А.И. Использование пластиковых отходов в качестве заполнителя в цементном растворе и приготовлении бетона // Инженерный вестник Дона. 2022. № 8 (92). С. 259–270. EDN OKBHDS.

33. Юркин Ю.В., Сиков Н.Е. Свойства и характеристики бетона и цементных растворов, содержащих пластмассовые отходы в качестве частичного заполнителя // Анализ и синтез сложных технических и технологических систем : сб. ст. Междунар. науч. конф. 2022. С. 26–28. EDN QRYGSV.

34. Алиев З.А. Вторичное использование пластиковых отходов в производстве строительных материалов // Аллея науки. 2020. Т. 1. № 8 (47). С. 38–41. EDN OJKTH.

35. Sofyan M., Parung H., Tjaronge M.W., Amiruddin Aa. Selected mechanical and physical properties concrete with polypropylene plastic Granule aggregate // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1117. P. 012014. DOI: 10.1088/1755-1315/1117/1/012014. EDN UMULMS.

36. Ahmed S.N., Hamah Sor N., Ahmed M.A., Qaidi Sh.M.A. Thermal conductivity and hardened behavior of eco-friendly concrete incorporating waste polypropylene as fine aggregate // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 57. Pp. 818–823. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.417. EDN ESRTJN.

37. Naveen D.C., Naresh K., Keerthi Gowda B.S., Reddy G.M.S., Prasad C.D., Shanmugam R. Effects of polypropylene waste addition as coarse aggregates in concrete: experimental Characterization and Statistical analysis // Advances in Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 2022. P. 7886722. DOI: 10.1155/2022/7886722. EDN CZBWDY.

38. Abu-Saleem M., Zhuge Y., Hassanli R., Ellis M., Rahman M., Levett P. Evaluation of concrete performance with different types of recycled plastic waste for kerb application // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 293. P. 123477. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123477. EDN UYOLUR.

39. Karthik M., Ajey Kumar V.G., Keshava M. Study on behavior of concrete mixes using waste plastics as an alternative for coarse aggregates // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 822. Issue 1. P. 012011. DOI: 10.1088/1755-1315/822/1/012011. EDN ABUUGF.

40. Harihanandh M., Karthik P. Feasibility study of recycled plastic waste as fine aggregates in concrete // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 52. Pp. 1807–1811. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.459. EDN OPRFLK.

41. Belmokaddem M., Mahi A., Senhadji Ya., Pekmezci B.Y. Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 257.

P. 119559. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119559. EDN FXXILR.

42. Park Ju.K., Kim D.J., Kim M.O. Mechanical behavior of waste fishing net fiber-reinforced cementitious composites subjected to direct tension // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 33. P. 101622. DOI: 10.1016/j.job.2020.101622. EDN WKIORE.

43. Islam M.J. Comparative Study of Concrete with Polypropylene and Polyethylene Terephthalate Waste Plastic as Partial Replacement of Coarse Aggregate // Advances in Civil Engineering. 2022. Vol. 2022. P. 4928065. DOI: 10.1155/2022/4928065. EDN WJWIJG.

44. Alkraway A., Shereen Q.A., Salah Nasr M., Ali Hasan Z., Shubbar A. Improving the mechanical behavior of pervious concrete using polypropylene and waste rope fibers // Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences. 2024. Vol. 17. Issue 1. Pp. 38–46. DOI: 10.30772/qjes.2024.146598.1114. EDN CEYPBC.

45. Suvidha Y., Jain S., Kumar C.A. Studies on partial replacement of waste high density polyethylene (HDPE) and polypropylene (PP) plastic with fine aggregate (FA) on mechanical, durability and thermal properties of M30 and M40 grade concrete // Discover Civil Engineering. 2024. Vol. 1. Issue 1. P. 8. DOI: 10.1007/s44290-024-00007-9. EDN BHORWT.

46. Malek M., Jackowski M., Lasica W., Kadel M. Characteristics of Recycled Polypropylene Fibers as an Addition to Concrete Fabrication Based on Portland Cement // Materials. 2020. Vol. 13. Issue 8. P. 1827. DOI: 10.3390/ma13081827. EDN BJQXFT.

47. Irlan A.O., Parung H., Tjaronge M.W., Caronge M.A. Mechanical, environmental, and cost evaluation of concrete using recycled polypropylene // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. 2025. Vol. 12. P. 101255. DOI: 10.1016/j.cscee.2025.101255. EDN WQKLTE.

48. Punitha V., Sakthieswaran N., Ganesh Babu O. Experimental investigation of concrete incorporating HDPE plastic waste and metakaolin // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 37. Pp. 1032–1035. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.288. EDN XRDWCZ.

49. Al-Osta M.A., Al-Tamimi A.S., Al-Tarbi S.M., Baghabra Al-Amoudi O.S., Al-Awsh W.A., Saleh T.A. Development of sustainable concrete using recycled high-density polyethylene and crumb tires: mechanical and thermal properties // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 45. P. 103399. DOI: 10.1016/j.job.2021.103399. EDN EAPHXU.

50. Liu T., Nafees A., Khan Sh., Javed M.F., Aslam F., Alabduljabbar H. et al. Comparative study of mechanical properties between irradiated and regular plastic waste as a replacement of cement and fine aggregate for manufacturing of green concrete // Ain Shams Engineering Journal. 2022. Vol. 13. Issue 2. P. 101563. DOI: 10.1016/j.asej.2021.08.006. EDN ZQIOEL.

51. Radhi M.M., Khalil W.I., Shafeeq S. Flexural behavior of sustainable reinforced concrete beams

containing HDPE plastic waste as coarse aggregate // Cogent Engineering. 2022. Vol. 9. Issue 1. DOI: 10.1080/23311916.2022.2127470. EDN HVVUJA.

52. *Tamil Selvi M., Dasarathy A.K., Ponkumar Ilango S.* Mechanical properties on light weight aggregate concrete using high density polyethylene granule // Materials Today: Proceedings. 2023. Vol. 81. Pp. 926–930. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.302. EDN OAUNKT.

53. *Tamrin, Nurdiana Ju.* The effect of recycled HDPE plastic additions on concrete performance // Recycling. 2021. Vol. 6. Issue 1. P. 18. DOI: 10.3390/recycling6010018. EDN IDYGGL.

54. *Aocharoen Ya., Chotickai P.* Compressive mechanical and durability properties of concrete with polyethylene terephthalate and high-density polyethylene aggregates // Cleaner Engineering and Technology. 2023. Vol. 12. P. 100600. DOI: 10.1016/j.clet.2023.100600. EDN UHJXLO.

55. *Duraiswamy S., Neelamegam P., VishnuPriyan M., Alaneme G.U.* Impact of plastic waste fiber and treated construction demolition waste on the durability and sustainability of concrete // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Issue 1. P. 27221. DOI: 10.1038/s41598-024-78107-w. EDN MXOSZX.

56. *Abu-Saleem M., Zhuge Ya., Hassanli R., Ellis M., Rahman Md.M., Levett P.* Impact Resistance and sodium sulphate attack testing of concrete incorporating mixed types of recycled plastic waste // Sustainability. 2021. Vol. 13. Issue 17. P. 9521. DOI: 10.3390/su13179521. EDN KELAMD.

57. *Tudu Ch., Mohanty M., Mohapatra S.S., Nayak S.* A systematic review exploring the feasibility of waste plastic as different constituents towards sustainable concrete // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 428. P. 136210. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136210. EDN NKTIYG.

58. *Musa A.E.S., Ahmed A., Ahmad S., Mohamed Kh., Al-Fakih A., Al-Osta M.A.* Properties of concrete incorporating plastic wastes and its applications : a comprehensive review // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 101. P. 111843. DOI: 10.1016/j.jobee.2025.111843. EDN VXAJCE.

59. *Almeshal I., Tayeh B.A., Alyousef R., Alabduljabbar H., Mustafa Mohamed A., Alaskar A.* Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites : a review // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 253. P. 119146. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119146. EDN DJKJNQ.

60. *Abbas S.N., Qureshi M.I.* Effect of recycled plastic aggregates on mechanical and durability properties of concrete : a review // Materials Chemistry and Physics: Sustainability and Energy. 2025. Vol. 3. P. 100016. DOI: 10.1016/j.macse.2025.100016. EDN WBILND.

61. *Bahij S., Omary S., Feugeas F., Faqiri A.* Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste : a review // Waste Management. 2020. Vol. 113. Pp. 157–175. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.05.048. EDN LYAGZQ.

Поступила в редакцию 14 ноября 2025 г.

Принята в доработанном виде 17 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 18 марта 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Анастасия Александровна Павловская** — студент, Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29, лит. Б; РИНЦ ID: 944534, ResearcherID: ADB-2524-2022, ORCID: 0000-0002-2423-1159; pavlovskaya.aa@gmail.com;

Анастасия Олеговна Носова — кандидат технических наук, ассистент, центр химической инженерии; **Национальный исследовательский университет ИТМО**; 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А; РИНЦ ID: 893035, Scopus: 58828871600, ResearcherID: NRY-9881-2025, ORCID: 0009-0009-2014-5876; aonosova@itmo.ru;

Майя Валерьевна Успенская — доктор технических наук, профессор, Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29, лит. Б; профессор, Институт химии; **Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ)**; 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9; РИНЦ ID: 176108, Scopus: 6602189454, ResearcherID: E-1095-2014, ORCID: 0000-0003-2510-2639; uspenskaya_mv@spbstu.ru.

Вклад авторов:

Павловская А.А. — сбор и обработка материала, написание статьи.

Носова А.О. — научное редактирование текста.

Успенская М.В. — идея, написание статьи, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Chalov K.V., Laguseva E.I., Lugovoy Yu.V., Doluda V.Yu. Method of polymer waste disposal. *Vestnik of Tver State Technical University. Series "Building. Electrical engineering and chemical technology"*. 2024; 4(24): 100-106. DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-100-106. EDN ARQFUU. (rus.).
2. Fayshal M.A. Current practices of plastic waste management, environmental impacts, and potential alternatives for reducing pollution and improving management. *Heliyon*. 2024; 10(23):e40838. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40838. EDN NHHOCQ.
3. Abahussain A.A.M., Nasr F.A., Jumah A.B., Saravanan P., Siva Kumar N., Al-zharani M. et al. Toxic threats from plastic waste: human health impacts, challenges, and policy solutions. *RSC Advances*. 2025; 15(48):40761-40788. DOI: 10.1039/d5ra05845g. EDN TSIVXY.
4. Qian K., Wang Lu., Teng J., Liu G. Strategies and technologies for sustainable plastic waste treatment and recycling. *Environmental Functional Materials*. 2025. DOI: 10.1016/j.efmat.2025.01.004. EDN XFRQSN.
5. Tansykkuzhina I.I. Environmental and economic aspects of recycling polymeric materials. *Bulletin of the Young Scientist of UGNTU*. 2025; 4(32):90-94. EDN FXIUPE. (rus.).
6. Beletsky Ya., Serdyuk A. Rational methods for recycling plastic waste. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2023; 5(163):37-43. EDN WQYRBK. (rus.).
7. Koop K.V. Mechanical recycling of plastic waste for the production of paving stones in residential areas of the village of Arshaly, Akmola Region. *Environmental Issues in Colleges and Schools: Experience in Conducting Green Events : Collection of Materials from the International Scientific and Practical Conference*. 2023; 75-79. EDN OCZCPF. (rus.).
8. Ukhartseva I.Yu., Tsvetkova E.A., Goldade V.A., Shapovalov V.M. Utilization of polymer packaging materials as a basis of environmental safety: traditional materials. *Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science*. 2021; 11(2):60-71. EDN SQQUFC. (rus.).
9. Muminova O.A., Kolesnikova L.A. Methods of processing polymer waste. *New materials and technologies for sustainable development : Proceedings of the III International Scientific Conference*. 2024; 138-140. EDN GKYPHOT. (rus.).
10. Salikhova E.V., Sayfullin R.M., Muruzina E.V. Use of secondary polymer raw materials in the production of building materials. *Development of modern science and technologies in the context of transformational processes : collection of materials of the XVII International scientific and practical conference*. 2023; 90-86. EDN ULYMVN. (rus.).
11. Malyutina M.S., Sergeeva A.A. Modern polymer waste recycling technologies and problems with their use. *The future of science: the view of young scientists on the innovative development of society : collection of scientific articles of the 2nd Russian youth scientific conference*. 2024; 146-149. EDN QONIQO. (rus.).
12. Lapitskiy S.A. Comparative analysis of various technologies for processing plastic waste. *Intellectual potential of young scientists as a driver of agricultural development : proceedings of the international scientific and practical conference of young scientists and students*. 2024; 270-273. EDN DXWZMA. (rus.).
13. Uhartseva I.Yu., Bobrysheva S.N., Seliukov I.V. Problems of household polymer waste disposal: technology and ecology. Part 1. Recycling and biodegradation (review). *Bulletin Sukhoi State Technical University of Gomel*. 2024; 4(99):28-42. DOI: 10.62595/1819-5245-2024-4-28-42. EDN KGOSED. (rus.).
14. Ishin L.A. Ecological content of polymer recycling prospects: ongoing and promising projects. *Bulletin of the South Russian State Technical University (NPI). Series: Socio-economic Sciences*. 2024; 17(4):182-193. DOI: 10.17213/2075-2067-2024-4-182-193. EDN ZFBJQU. (rus.).
15. Vinogradova E.V., Murzina O.G., Tangiev A.M. Prospects for the use of plastic waste in construction. *Engineering journal of Don*. 2020; 10(70):270-266. EDN ZTAADK. (rus.).
16. Borevich Ya.P. Various methods of processing polymer waste and their application in construction. *Science Today: technical and natural sciences : Collection of materials of the XXXVI International part-time scientific and practical conference*. 2023; 101-104. EDN KJTWQJ. (rus.).
17. Ajith A., Swapna M.S., Sankararaman S. Clay-plastic-biodegradable waste composite as low carbon construction material: A way to sustainable development. *Construction and Building Materials*. 2025; 488:142151. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142151. EDN AFGJFL.
18. Magbool H.M. Sustainability of utilizing recycled plastic fiber in green concrete : a systematic review. *Case Studies in Construction Materials*. 2025; 22:e04432. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04432. EDN IWNSJU.
19. Saha S., Sau D., Hazra T. Economic viability analysis of recycling waste plastic as aggregates in green sustainable concrete. *Waste Management*. 2023; 169:289-300. DOI: 10.1016/j.wasman.2023.07.023. EDN ATRRPZ.
20. Baruzdin A., Zakrevskaya L. Prospects for the use of polymer waste as concrete aggregates. *Technique and Technology of Silicates*. 2024; 31(3): 247-261. DOI: 10.62980/2076-0655-2024-247-261. EDN AYZFSM. (rus.).
21. Jain A., Siddique S., Gupta T., Sharma R.K., Chaudhary S. Utilization of shredded waste plastic bags

- to improve impact and abrasion resistance of concrete. *Environment, Development and Sustainability*. 2020; 22(1):337-362. DOI: 10.1007/s10668-018-0204-1. EDN GYOAWD.
22. Pasha M.Sh., Aslam M.F., Hamza M., Ali N.M., Jabbar I., Ahmed S., Abbasi H.K.Ja. Sustainable construction: Performance analysis of concrete incorporating E-waste plastic aggregates and silica fume. *Construction and Building Materials*. 2025; 474:141103. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141103. EDN CJUYAK.
23. Attia M.M., Elsadany R.A., Khalil M.H., Ahmed M., Baktheer A., Shawkya Sh.M.M. Physical and mechanical properties of concrete containing plastic tube fibers. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 21:e03809. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03809. EDN KMOKWF.
24. Soharu A., Naveen B.P., Vaid K. Influence of using waste plastic as coarse aggregates-based sustainable concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Waste and Resource Management*. 2026; 179(1):45-54. DOI: 10.1680/jwarm.25.00017
25. Guo Y.Ch., Li X.Mi., Zhang J., Lin J.X. A review on the influence of recycled plastic aggregate on the engineering properties of concrete. *Journal of Building Engineering*. 2023; 79:107787. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107787. EDN EEGPUG.
26. Baruzdin A.A., Sharonov D.I., Prokhorov S.V. Recycling of polymer waste. *Quality of life: architecture, construction, transport, education : collection of materials of the III International scientific and practical conference*. 2025; 206-208. EDN HBFTBD. (rus.).
27. Kovalev K.Yu., Monastyrskiy D.I. Use of recycled plastic bottles in construction. *Modern problems of ecology and industrial safety : materials of the IV Russian scientific and technical conference*. 2025; 36-38. EDN TZORGG. (rus.).
28. Al'obaidi D.A., Khudyakov A.V. Application of plastic waste as a fine aggregate in concrete. *Looking at the problems of young regional economy – 2018 : proceedings of the Russian open competition of university students and young researchers*. 2018; 137-140. EDN YOJLED. (rus.).
29. Hamada H.M., Al-Attar A., Abed F., Beddu S., Humada A.M., Majdi A. et al. Enhancing sustainability in concrete construction: A comprehensive review of plastic waste as an aggregate material. *Sustainable Materials and Technologies*. 2024; 40:e00877. DOI: 10.1016/j.susmat.2024.e00877. EDN ESWEUC.
30. Almohana A.I., Abdulwahid M.Ya., Galobardes I., Mushtaq Ja., Almojil S.F. Producing sustainable concrete with plastic waste : a review. *Environmental Challenges*. 2022; 9:100626. DOI: 10.1016/j.envc.2022.100626. EDN HOYMHJ.
31. Proskurnin A.M., Zhuzhoma K.I., Afanas'yev A.P. The use of plastic waste as building materials. *Actual issues of modern science and innovation : collection of scientific articles based on the materials of the I International scientific and practical conference*. 2023; 290-294. EDN CHBTHG. (rus.).
32. Sikov N.E., Seryogin A.I. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation. *Engineering journal of Don*. 2022; 8(92):259-270. EDN OKBHDS. (rus.).
33. Yurkin Yu.V., Sikov N.E. Properties and characteristics of concrete and cement mortars containing waste plastics as partial aggregate. *Analysis and synthesis of complex technical and technological systems : collection of articles from the international scientific conference*. 2022; 26-28. EDN QRYGSV. (rus.).
34. Aliev Z.A. Recycling of plastic waste in the production of building materials. *Alley Science*. 2020; 1(8):(47): 38-41. EDN OJKTIJ. (rus.).
35. Sofyan M., Parung H., Tjaronge M.W., Amiruddin Aa. Selected mechanical and physical properties concrete with polypropylene plastic Granule aggregate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 1117:012014. DOI: 10.1088/1755-1315/1117/1/012014. EDN UMULMS.
36. Ahmed S.N., Hamah Sor N., Ahmed M.A., Qaidi Sh.M.A. Thermal conductivity and hardened behavior of eco-friendly concrete incorporating waste polypropylene as fine aggregate. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 57:818-823. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.417. EDN ESRTJN.
37. Naveen D.C., Naresh K., Keerthi Gowda B.S., Reddy G.M.S., Prasad C.D., Shanmugam R. Effects of polypropylene waste addition as coarse aggregates in concrete: experimental Characterization and Statistical analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022; 2022:7886722. DOI: 10.1155/2022/7886722. EDN CZBWDY.
38. Abu-Saleem M., Zhuge Y., Hassanli R., Ellis M., Rahman M., Levett P. Evaluation of concrete performance with different types of recycled plastic waste for kerb application. *Construction and Building Materials*. 2021; 293:123477. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123477. EDN UYOLUR.
39. Karthik M., Ajey Kumar V.G., Keshava M. Study on behavior of concrete mixes using waste plastics as an alternative for coarse aggregates. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 822(1):012011. DOI: 10.1088/1755-1315/822/1/012011. EDN ABUUFQ.
40. Harihanandh M., Karthik P. Feasibility study of recycled plastic waste as fine aggregates in concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 52:1807-1811. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.459. EDN OPRFLK
41. Belmokaddem M., Mahi A., Senhadji Ya., Pekmezci B.Y. Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate. *Construction and Building Materials*. 2020; 257:119559. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119559. EDN FXXILR.

42. Park Ju.K., Kim D.J., Kim M.O. Mechanical behavior of waste fishing net fiber-reinforced cementitious composites subjected to direct tension. *Journal of Building Engineering*. 2021; 33:101622. DOI: 10.1016/j.job.2020.101622. EDN WKIORE.
43. Islam M.J. Comparative Study of Concrete with Polypropylene and Polyethylene Terephthalate Waste Plastic as Partial Replacement of Coarse Aggregate. *Advances in Civil Engineering*. 2022; 2022:4928065. DOI: 10.1155/2022/4928065. EDN WJWIJG.
44. Alkraway A., Shereen Q.A., Salah Nasr M., Ali Hasan Z., Shubbar A. Improving the mechanical behavior of pervious concrete using polypropylene and waste rope fibers. *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*. 2024; 17(1):38-46. DOI: 10.30772/qjes.2024.146598.1114. EDN CEYPBC.
45. Suvidha Y., Jain S., Kumar C.A. Studies on partial replacement of waste high density polyethylene (HDPE) and polypropylene (PP) plastic with fine aggregate (FA) on mechanical, durability and thermal properties of M30 and M40 grade concrete. *Discover Civil Engineering*. 2024; 1(1):8. DOI: 10.1007/s44290-024-00007-9. EDN BHORWT.
46. Małek M., Jackowski M., Łasica W., Kadela M. Characteristics of Recycled Polypropylene Fibers as an Addition to Concrete Fabrication Based on Portland Cement. *Materials*. 2020; 13(8):1827. DOI: 10.3390/ma13081827. EDN BJQXFT.
47. Irlan A.O., Parung H., Tjaronge M.W., Caronge M.A. Mechanical, environmental, and cost evaluation of concrete using recycled polypropylene. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2025; 12:101255. DOI: 10.1016/j.cscee.2025.101255. EDN WQKLTE.
48. Punitha V., Sakthieswaran N., Ganesh Babu O. Experimental investigation of concrete incorporating HDPE plastic waste and metakaolin. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 37:1032-1035. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.288. EDN XRDWCZ.
49. Al-Osta M.A., Al-Tamimi A.S., Al-Tarbi S.M., Baghabra Al-Amoudi O.S., Al-Awsh W.A., Saleh T.A. Development of sustainable concrete using recycled high-density polyethylene and crumb tires: mechanical and thermal properties. *Journal of Building Engineering*. 2022; 45:103399. DOI: 10.1016/j.job.2021.103399. EDN EAPHXU.
50. Liu T., Nafees A., Khan Sh., Javed M.F., Aslam F., Alabduljabbar H. et al. Comparative study of mechanical properties between irradiated and regular plastic waste as a replacement of cement and fine aggregate for manufacturing of green concrete. *Ain Shams Engineering Journal*. 2022; 13(2):101563. DOI: 10.1016/j.asej.2021.08.006. EDN ZQIOEL.
51. Radhi M.M., Khalil W.I., Shafeeq S. Flexural behavior of sustainable reinforced concrete beams containing HDPE plastic waste as coarse aggregate. *Cogent Engineering*. 2022; 9(1). DOI: 10.1080/23311916.2022.2127470. EDN HVVUJA.
52. Tamil Selvi M., Dasarathy A.K., Ponkumar Ilango S. Mechanical properties on light weight aggregate concrete using high density polyethylene granule. *Materials Today: Proceedings*. 2023; 81:926-930. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.302. EDN OAUNKT.
53. Tamrin, Nurdiana Ju. The effect of recycled HDPE plastic additions on concrete performance. *Recycling*. 2021; 6(1):18. DOI: 10.3390/recycling6010018. EDN IDYGGL.
54. Aocharoen Ya., Chotickai P. Compressive mechanical and durability properties of concrete with polyethylene terephthalate and high-density polyethylene aggregates. *Cleaner Engineering and Technology*. 2023; 12:100600. DOI: 10.1016/j.clet.2023.100600. EDN UHJXLO.
55. Duraiswamy S., Neelamegam P., VishnuPriyan M., Alaneme G.U. Impact of plastic waste fiber and treated construction demolition waste on the durability and sustainability of concrete. *Scientific Reports*. 2024; 14(1):27221. DOI: 10.1038/s41598-024-78107-w. EDN MXOSZX.
56. Abu-Saleem M., Zhuge Ya., Hassanli R., Ellis M., Rahman Md.M., Levett P. Impact Resistance and sodium sulphate attack testing of concrete incorporating mixed types of recycled plastic waste. *Sustainability*. 2021; 13(17):9521. DOI: 10.3390/su13179521. EDN KELAMD.
57. Tudu Ch., Mohanty M., Mohapatra S.S., Nayak S. A systematic review exploring the feasibility of waste plastic as different constituents towards sustainable concrete. *Construction and Building Materials*. 2024; 428:136210. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136210. EDN NKTIYG.
58. Musa A.E.S., Ahmed A., Ahmad S., Mohamed Kh., Al-Fakih A., Al-Osta M.A. Properties of concrete incorporating plastic wastes and its applications : a comprehensive review. *Journal of Building Engineering*. 2025; 101:111843. DOI: 10.1016/j.job.2025.111843. EDN VXAJCE.
59. Almeshal I., Tayeh B.A., Alyousef R., Alabduljabbar H., Mustafa Mohamed A., Alaskar A. Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites : a review. *Construction and Building Materials*. 2020; 253:119146. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119146. EDN DJKJNQ.
60. Abbas S.N., Qureshi M.I. Effect of recycled plastic aggregates on mechanical and durability properties of concrete : a review. *Materials Chemistry and Physics: Sustainability and Energy*. 2025; 3:100016. DOI: 10.1016/j.mace.2025.100016. EDN WBILND.
61. Bahij S., Omary S., Feugeas F., Faqiri A. Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste : a review. *Waste Management*. 2020; 113:157-175. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.05.048. EDN LYAGZQ.

Received November 14, 2025.

Adopted in revised form on March 17, 2026.

Approved for publication on March 18, 2026.

B I O N O T E S: **Anastasiya A. Pavlovskaya** — student, Higher School of Industrial, Civil and Road Construction; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 letter B Politekhnikeskaya st., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 944534, ResearcherID: ADB-2524-2022, ORCID: 0000-0002-2423-1159; pavlovskaya.aa@gmail.com;

Anastasiia O. Nosova — Candidate of Technical Sciences, Assistant, Chemical Engineering Center; **ITMO University**; 49 letter A Kronverkskiy av., Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; ID RSCI: 893035, Scopus: 58828871600, ResearcherID: NRY-9881-2025, ORCID: 0009-0009-2014-5876; aonosova@itmo.ru;

Mayya V. Uspenskaya — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor, Higher School of Industrial, Civil and Road Construction; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 letter B Politekhnikeskaya st., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; Professor, Institute of Chemistry; **Saint Petersburg State University (SPbSU)**; 7–9 Universitetskaya Nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation; ID RSCI: 176108, Scopus: 6602189454, ResearcherID: E-1095-2014, ORCID: 0000-0003-2510-2639; uspenskaya_mv@spbstu.ru.

Contribution of the authors:

Anastasiya A. Pavlovskaya — collection of material, processing of material, manuscript writing.

Anastasiia O. Nosova — scientific editing of text.

Mayya V. Uspenskaya — idea, manuscript writing, scientific editing of the text.

The authors declare no conflict of interest.

Размыв берегов рек: современное состояние исследований

Фам Нгок Тхинь
Университет Туйлои; г. Ханой, Вьетнам

АННОТАЦИЯ

Введение. Размыв берегов рек представляет собой сложный многомерный процесс, формирующий речные ландшафты, определяющий транспорт наносов и устойчивость экосистем. Он оказывает существенное воздействие на инфраструктуру и условия жизни населения, особенно в прибрежных и дельтовых районах. В условиях глобальных изменений окружающей среды значение данной проблемы возрастает.

Материалы и методы. Обзор основан на синтезе более чем 40-летнего междисциплинарного исследования процессов размыва берегов. Проведен систематический поиск литературы по семи тематическим направлениям: механизмы размыва, методы измерений, моделирование, растительность, климат, антропогенное влияние и социально-экономические последствия. Применялись современные методы, включая дистанционное зондирование высокого разрешения, моделирование (BSTEM) и седиментологический анализ источников наносов.

Результаты. Установлено, что размыв обусловлен взаимодействием гидравлических сил, свойств почвы, характеристик растительности, климатических колебаний и антропогенных вмешательств. Несмотря на достижения в области мониторинга и моделирования, сохраняются проблемы стандартизации и интеграции данных. Социально-экономические последствия, такие как утрата инфраструктуры и переселение, слабо представлены в моделях.

Выводы. Обозначены важнейшие научные пробелы, включая влияние изменения климата, инвазивной растительности и комплексного антропогенного давления. Подчеркивается необходимость системного междисциплинарного подхода для повышения точности прогнозирования и формирования устойчивых стратегий управления речными берегами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: размыв берегов рек, транспорт наносов, растительность, гидравлическое моделирование, дистанционное зондирование, социально-экономические последствия, изменение климата

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Фам Н.Т. Размыв берегов рек: современное состояние исследований // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 6. С. 964–975. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.964-975

Автор, ответственный за переписку: Фам Нгок Тхинь, thinhtls@tlu.edu.vn.

Riverbank erosion: a state-of-the-art review

Pham Ngoc Thinh
Thuyloi University; Hanoi, Vietnam

ABSTRACT

Introduction. Riverbank erosion is a complex, multidimensional process that influences fluvial landscapes, sediment fluxes, and stability of eco-systems. It has affects infrastructure and livelihoods, particularly in riparian and deltaic regions. This topic has attracted considerable scholarly attention due to its environmental and socio-economic implications under the pressures of global change.

Materials and methods. This review synthesizes more than 40 years of interdisciplinary research on riverbank erosion. A systematic literature search was conducted across major scientific databases, focusing on seven thematic areas including erosion mechanisms, measurement, modeling, vegetation, climate, and socio-economic impacts. Methodologies include high-resolution remote sensing, sediment fingerprinting, and process-based modeling tools such as BSTEM.

Results. The analysis reveals a dynamic interplay between hydraulic forces, soil properties, vegetation traits, climate variability, and human interventions. Key methodological advances have improved monitoring and prediction, yet standardization and integration across spatial and disciplinary scales remain limited. Socio-economic consequences, including displacement and infrastructure loss, are still underrepresented in modeling frameworks.

Conclusions. The review highlights critical knowledge gaps, particularly regarding the impact of climate change, invasive species, and cross-scale human activity. It advocates for a systems-based, interdisciplinary approach to improve erosion modeling and support resilient, equitable river management strategies.

KEYWORDS: riverbank erosion, sediment transport, vegetation dynamics, hydraulic modeling, remote sensing, socio-economic impacts, climate change

FOR CITATION: Pham N.Th. Riverbank erosion: a state-of-the-art review. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(6):964-975. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.964-975 (rus.).

Corresponding author: Pham Ngoc Thinh, thinhtls@tlu.edu.vn.

ВВЕДЕНИЕ

Размыв берегов рек играет ключевую роль в формировании русловых ландшафтов, управляет транспортом наносов, изменяет морфологию русла и оказывает влияние на качество воды и состояние водных экосистем. В последние десятилетия междисциплинарные исследования значительно продвинулись в понимании сложных взаимодействий между гидродинамическими процессами, геотехническими свойствами грунтов, растительностью и антропогенными воздействиями, определяющими механизмы размыва берегов [1–8].

Размыв берегов рек представляет собой многомерный (многофакторный) процесс, в котором пространственно-временная изменчивость русловых форм, гидравлических параметров потока и свойств берегового материала проявляются на различных масштабах — от локального размыва у подошвы откоса до перестройки русла на участке. Под «многомерностью» в настоящей работе понимается совокупность геометрической сложности русла и откосов; временной нестационарности гидрологического режима; механистического разнообразия механизмов разрушения (сдвиговое размывание, подмыв подошвы, обрушение, суффозия и др.) и материальной неоднородности береговых отложений.

Ранние фундаментальные обзоры подчеркивали двойственную природу данного процесса, связанную с флювиальным захватом частиц и массовыми обрушениями, а также необходимость разработки надежных многоуровневых методов измерений и прогнозных моделей, способных учитывать пространственно-временную изменчивость эрозии [9–13]. С развитием дистанционного зондирования численного моделирования и экспериментальных методов все более явно прослеживается динамическая взаимосвязь между физическими процессами (турбулентность, фильтрация, циклы «промерзания – оттаивания») и биологическими либо антропогенными факторами (видовой состав растительности, агротехнические практики, нарушения прибрежных зон) [1–3, 6, 14–18].

Человеческий фактор, в особенности вызванные эрозией перемещения населения, разрушение инфраструктуры и рост региональной уязвимости, становится более заметным в научных исследованиях и политической повестке [15, 17]. Актуальной задачей является согласование мер обеспечения устойчивости берегов с требованиями экологической устойчивости и климатической адаптивности, что требует комплексного интегрированного подхода. Несмотря на достигнутый прогресс, сохраняются существенные проблемы: количественная оценка эрозии в различных природных условиях, анализ долгосрочной эффективности стабилизационных мер и гармонизация модельных подходов на междисциплинарном и межрегиональном уровнях [19–25].

Настоящий обзор систематизирует новейшие и наиболее влиятельные исследования, формируя целостное представление о современном состоянии науки о размыве берегов рек. Особое внимание уделено механизмам и факторам, методам наблюдений и моделирования, влиянию человеческой деятельности и мерам управления. Подчеркивается роль методологических инноваций, междисциплинарных связей и новых научных направлений, необходимых для разработки устойчивых стратегий управления речными берегами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В обзоре применен систематический подход, направленный на всесторонний охват современных исследований по проблеме размыва берегов рек. Основными источниками данных выступали ведущие научные базы Semantic Scholar, Crossref, Scopus, PubMed. Поиск охватывал публикации, доступные до июля 2025 г., без географических ограничений. Для структурирования обзора было выделено семь тематических направлений, соответствующих основным научным трендам (табл. 1).

Критерии включения:

- статьи из рецензируемых журналов, систематические обзоры, материалы ведущих конференций;
- публикации на английском языке;
- исследования, прямо рассматривающие механизмы, моделирование, измерения или управление процессами размыва берегов.

Исключались:

- «серая» литература (отчеты ведомств, диссертации, блогговые публикации);
- работы, посвященные исключительно склоновым или овражным эрозионным процессам без связи с размывом берегов;
- статьи без достаточной методологической прозрачности или эмпирической основы.

По результатам начального поиска было найдено 1046 публикаций. Отбор выполнялся в несколько этапов в соответствии с рекомендациями протокола PRISMA:

- первичный скрининг названий и аннотаций — отобрана 421 работа;
- анализ полнотекстовых материалов — 332 статьи;
- финальный набор включил 41 наиболее значимую публикацию, отобранную по критериям тематической релевантности, научной значимости (цитируемости), методологической ясности и междисциплинарного охвата.

Для систематизации литературного поиска по теме размыва берегов рек разработан набор тематических групп, отражающих основные направления современных исследований. Каждая группа включает примерные ключевые слова и поисковые запросы, использованные при анализе научных публикаций. Рис. 1 демонстрирует данную классификацию и при-

Табл. 1. Тематическая классификация поисковых запросов

Table 1. Thematic classification of literature search queries

Тематическая группа / Thematic group	Поисковые запросы / Queries
Механизмы и факторы размыва / Mechanisms and drivers	Турбулентность и размыв берегов; геотехнические обрушения / Turbulence and bank erosion; geotechnical failures
Методы измерений / Measurement techniques	Точность эрозионных шпилек; дистанционное зондирование и миграция русла / Erosion pin accuracy; remote sensing and channel migration
Подходы к моделированию / Modeling approaches	BSTEM-моделирование; симуляция транспорта наносов BSTEM modeling; sediment transport simulation
Методы управления и стабилизации / Management practices	Методы укрепления берегов; биоинженерные конструкции Bank stabilization methods; bioengineering structures
Растительность и землепользование / Vegetation and land use	Прибрежная растительность и эрозия; изменения землепользования и наносы / Riparian vegetation and erosion; land-use change and sediment
Климатические воздействия / Climate change impacts	Промерзание — оттаивание и эрозия; климатическая нестабильность берегов / Freeze — thaw and erosion; climate-driven bank instability

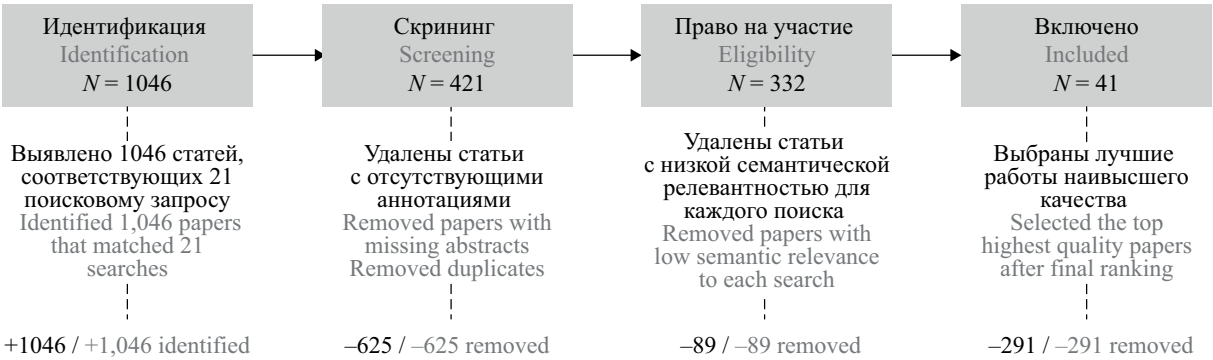


Рис. 1. Схема выбора публикаций на основе протокола PRISMA (составлена автором)

Fig. 1. PRISMA-based literature selection workflow (compiled by the author)

мененные запросы, что позволяет обеспечить прозрачность и воспроизводимость методологии поиска.

Для каждой из выбранных статей фиксировались:

- цели и задачи исследования (например, турбулентность, моделирование, влияние растительности);
- географический и экологический контекст (холодные регионы, дельтовые системы, сельскохозяйственные бассейны);
- используемые методы (экспериментальные русловые установки, дистанционное зондирование, численное моделирование);
- основные выводы и выявленные ограничения;
- практическая и управленческая значимость результатов.

Синтез информации выполнялся с использованием матричного подхода к тематическому кодированию, что позволило выявить новые закономерности, слабоизученные взаимосвязи и методологические тенденции в междисциплинарных исследованиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Физические факторы размыва берегов рек. Размыв берегов рек обусловлен сложным взаимодействием гидродинамических сил, механических свойств грунтов, климатических колебаний, динамики прибрежной растительности и антропогенных изменений пойменных экосистем. Эти факторы могут действовать как по отдельности, так и совместно, вызывая постепенные либо эпизодические обвалы, что усложняет прогнозирование и управление эрозионными процессами.

Гидродинамические силы. Целесообразно различать: 1) касательные (сдвиговые) напряжения на границе поток – грунт (τ); 2) силы сопротивления (drag) и подъемные силы (lift), действующие на частицы и элементы берегового материала; 3) пульсации давления и турбулентные выбросы (burst/sweep); 4) влияние вторичных течений и кривизны русла, приводящее к перераспределению скоростей и напряжений у берега; 5) эффекты подмыва у подошвы

откоса и локального вихреобразования. Такое разграничение позволяет корректно интерпретировать механизмы инициирования размыва и последующей деформации откоса.

Турбулентные потоки и локальные касательные напряжения являются одними из главных факторов отступления берегов. Когерентные структуры течения, включая вихри, циклы всплесков и вторичные течения, вызывают колебания касательных напряжений на поверхности откосов, способствуя срыву частиц, подмыву подошвы склона и последующему массовому обрушению [1, 2, 6]. Эти процессы особенно интенсивны в излучинах и около гидротехнических сооружений, где наблюдаются повышенные градиенты скорости [7]. Согласно результатам Das и Debnath (2025), турбулентные всплески значительно снижают критическое напряжение для начала размыва в связных грунтах, особенно в сложных и меандрирующих руслах [1]. Примером может быть размыв берега в зоне излучины на реке в условиях тропического климата. Турбулентные потоки и локальные касательные напряжения способствуют подмыву подошвы откоса и последующему обрушению, что хорошо видно на приведенной фотографии (рис. 2). Такой тип обрушений особенно распространен в излучинах рек тропических регионов, где интенсивные потоки подмывают подошву склона.

Геотехнические факторы. Свойства грунта когезия, прочность на сдвиг, плотность, слоистость существенно влияют на устойчивость берегов. Быстрая сработка уровня воды или насыщение пород могут приводить к вращательным сдвигам, опрокидыванию или плоскостному обрушению откоса, в зависимости

от внутренней структуры и динамики порового давления [10–12]. Подповерхностные гидрологические процессы (например, фильтрация, межпластовый сток) часто недооцениваются, но способны значительно ослаблять откосы изнутри. Так, Fox и Wilson (2010) выявили, что в лёссовых и глинистых берегах влажного климата именно подпочвенный сток становится главным триггером обрушений [12].

Климатические и криогенные процессы. В холодных и приполярных регионах циклы промерзания – оттаивания вызывают расширение поровой воды при замерзании и ослабление структуры грунта при оттаивании, что приводит к резким эпизодам обрушений [3, 26, 27]. Деграция многолетней мерзлоты и ледовые воздействия дополнительно увеличивают риск эрозии. Chassiot и соавт. (2020) подчеркнули необходимость явного учета тепловых процессов в моделях, применяемых для арктических и субарктических экосистем [3].

Роль растительности. Прибрежная растительность может как стабилизировать, так и дестабилизировать берега. Корневая система растений укрепляет грунт, увеличивает его когезию и снижает эрозионную восприимчивость, повышая долговременную устойчивость откосов [6, 7, 14]. Однако при определенных гидрологических и геоморфологических условиях растительность способна усугублять нестабильность, например, из-за увеличения массы откоса, локального перенаправления потоков или распространения неглубококорневых инвазивных видов. Ahmed и Mohanadhas (2025) показали, что влияние растительности строго видоспецифично и не может рассматриваться как однозначно положительное [6].



Рис. 2. Размыв берега в излучине р. Меконг, Вьетнам (дельта Меконга) (фото Google)

Fig. 2. Bank erosion at a meander bend of the Mekong River in the Mekong Delta, Vietnam (Google image)

Антропогенные изменения. Преобразование земель, вырубка лесов, развитие сельского хозяйства и урбанизация, а также гидротехнические вмешательства усиливают процессы размыва. Удаление коренных растений и уплотнение почв повышают поверхностный сток и снижают корневое армирование, тогда как дамбы, шпоры и плотины изменяют режимы наносов и гидравлику русла [5, 16]. Например, Zaimes и соавт. (2019) выявили, что расширение сельскохозяйственных угодий на поймах Среднего Запада США ускоряет отступление берегов и образование оврагов [5]. Незаконная добыча песка вызывает углубление русла и подмыв подошвы откосов, дополнительно снижая их устойчивость [17, 18].

Методы наблюдения и моделирования. Точное понимание и прогнозирование размыва берегов требует комплексного применения полевых измерений, технологий дистанционного зондирования и численного моделирования. Несмотря на существенный прогресс, сохраняются проблемы масштабной сопоставимости данных, параметрической неопределенности и методологической фрагментации.

Полевые методы. Простейшие способы мониторинга — эрозионные шпильки, маркеры, повторные поперечные профили позволяют фиксировать отступление откосов во времени [9, 13]. Дополнительно применяются фотосъемка с временным интервалом, фотограмметрия и приборы для измерения прочности грунта (например, jet erosion device). Однако высокая трудоемкость, локальный характер и зависимость от сезонной влажности ограничивают их использование.

Дистанционное зондирование. Технологии LiDAR обеспечивают высокоточные цифровые модели ре-

льефа (DEM), позволяя выявлять малые изменения береговой линии [28, 29]. Беспилотные летательные аппараты (UAV) обеспечивают гибкий и высокочастотный мониторинг отдельных участков, а спутниковые системы (Landsat, Sentinel) дают возможность отслеживать миграцию русла и трансформацию землепользования на протяжении десятилетий [30]. Однако такие методы не дают информации о подповерхностных процессах и требуют наземной калибровки. Данные аэрофотосъемки и LiDAR позволяют отслеживать пространственно-временную динамику береговой линии. На примере участка через коммуна Лонг Хау видно значительное отступление берега за определенный период времени (рис. 3).

Моделирование. Эмпирические модели используют статистические зависимости между скоростью размыва и параметрами окружающей среды (расход, уклон, текстура грунта), но часто ограничены локальной применимостью [10]. Такие модели, как BSTEM и SRH-2D, позволяют учитывать сложные гидрогеотехнические взаимодействия в динамической среде [19, 31]. Двумерные модели типа SRH-2D решают уравнения мелкой воды с учетом транспорта наносов и поперечного отступления берегов.

Идентификация источников наносов. Методы идентификации источников наносов с использованием радионуклидов и геохимических индикаторов (^{137}Cs , ^{210}Pb) помогают оценить вклад размыва берегов в общий сток наносов в бассейне [32]. Ограничениями являются высокая стоимость лабораторных анализов и недостаточное временное разрешение для регистрации кратковременных событий.

Антропогенные воздействия и меры управления. Размыв берегов следует рассматривать не только



Рис. 3. Изменение линии берега в районе коммуны Лонг Хау (дельта Меконга) (составлено автором)

Fig. 3. Riverbank changes in the Long Hau commune area (Mekong Delta) (compiled by the author)



Рис. 4. Биоинженерное укрепление берега в районе Чау Тхань (дельта Меконга) (фото Google)

Fig. 4. Bioengineered bank stabilization near Chau Thanh in the Mekong Delta, Vietnam (Google image)

как гидроморфологический процесс, но и как социально опосредованное явление, определяемое решениями в области землепользования, инженерными вмешательствами и институциональной организацией управления.

Использование земель. Превращение пойменных лесов и болот в сельхозугодья или городскую застройку снижает корневое армирование и увеличивает поверхностный сток [5, 33]. Урбанизация увеличивает долю водонепроницаемых покрытий и ограничивает естественную миграцию русла.

Гидротехнические сооружения. Дамбы, шпоры, плотины и спрямление русла, предназначенные для защиты берегов или борьбы с паводками, нередко перераспределяют эрозионные процессы вниз по течению, нарушая естественные гидравлические и наносные режимы [24, 25].

Добыча песка. Эти процессы особенно ярко проявляются в дельтовых системах, включая Меконг и другие бассейны, где рост добычи песка вызывает серьезные геоморфологические и экологические последствия [17, 18, 34].

Социально-экономические последствия. Эти последствия подтверждаются в долгосрочных исследованиях бассейна Чесапик, где потеря земель и инфраструктуры прямо связана с динамикой осадков и береговой эрозией [15, 35]. В большинстве моделей и оценок риска эти последствия до сих пор недостаточно учтены.

Меры стабилизации. Инженерные конструкции (ряжи, габионы, бетонные стенки) обеспечивают быстрый эффект, но нарушают экосистемные связи и часто усиливают эрозию ниже по течению [24, 36]. Эффективность таких подходов подтверждена в ряде работ, сравнивающих традиционные и биотехнические методы стабилизации [23, 24, 37]. На примере (рис. 4) показано биоинженерное укрепление откоса с использованием геотекстиля и кустарников.

Для систематизации обзора и выделения наиболее значимых исследований составлена сводная таблица (табл. 2), содержащая основные направления, географический охват, ключевые результаты и выявленные научные пробелы в выбранных обзорных публикациях по теме размыва берегов рек.

Табл. 2. Обобщение выбранных обзорных статей и исследовательских пробелов

Table 2. Summarized selected review papers and research gaps

Статья / Paper	Основной фокус Focus	Регион / Region	Ключевые результаты Key results	Выявленные пробелы Identified research gaps
Понимание эрозии берегов рек через призму турбулентности: обзор / Understanding riverbank erosion through the lens of turbulence: A review	Турбулентность и методы измерений Turbulence and measurement techniques	Глобальный (лабораторные и полевые исследования) Global (laboratory and field studies)	Турбулентность — ключевой фактор (драйвер) размыва; необходима стандартизация методов / Turbulence is a key driver of erosion; Standardization of methods is needed	Недостаточная сопоставимость результатов различных исследований Limited comparability across studies

Статья / Paper	Основной фокус Focus	Регион / Region	Ключевые результаты Key results	Выявленные проблемы Identified research gaps
Обзор отступления берегов: механизмы, наблюдения и моделирование A review of bank retreat: mechanisms, observations, and modeling	Механизмы, наблюдения и моделирование Mechanisms, observations, and modeling	Реки и приливные каналы / Rivers and tidal channels	Важность гидравлических и геотехнических факторов; предложена иерархия новых моделей / Importance of hydraulic and geotechnical factors; hierarchy of new models proposed	Недостаток исследований обратных связей и многофакторных взаимодействий Lack of studies on feedbacks and multifactor interactions
Измерение эрозии берегов рек и бокового смещения русла: обзор The measurement of river bank erosion and lateral channel change: a review	Методы измерения Measurement methods	Глобальный Global	Хронологический обзор полевых и дистанционных методов / Chronological review of field and remote sensing methods	Проблемы точности, повторяемости и масштабируемости Problems of accuracy, repeatability, and scalability
Оценка процессно-ориентированной модели для стабилизации берегов: модель BSTEM Evaluating the BSTEM process-based model for Riverbank Stabilization	Анализ модели BSTEM BSTEM model analysis	Центральные США, глобальная значимость Central USA, global relevance	Модель требует дополнительного тестирования и уточнения параметров / The model needs further testing and parameter refinement	Недостаточная интеграция данных о растительности и субаэральных процессах Insufficient integration of vegetation and subaerial processes
Берега рек как источник наносов и фосфора Riverbanks as a source of sediment and phosphorus	Вклад размыва в транспорт наносов и фосфора Contribution of bank erosion to sediment and phosphorus transport	Водосборные бассейны США U. S. watersheds	Берега — главный источник фосфора и осадков; высокая неопределенность оценок / Riverbanks as a major source of phosphorus and sediment; high uncertainty in estimates	Необходимы расширенные методы мониторинга и анализа неопределенностей Need for advanced monitoring and uncertainty analysis

Обсуждение и выявленные научные проблемы

Систематизация результатов обзора показывает, что размыв берегов рек является многофакторным и многоуровневым процессом, формируемым взаимозависимыми физическими, биологическими и антропогенными воздействиями. Несмотря на значительный прогресс в выявлении отдельных факторов турбулентности, геотехнической неустойчивости, влияния растительности, главной научной задачей остается понимание их комплексного взаимодействия в реальных динамических системах.

Нелинейные связи и управленческие вызовы. Один из ключевых аспектов — нелинейная взаимосвязь между физическими драйверами и человеческой деятельностью. Например, изменение землепользования одновременно модифицирует гидрологические характеристики (усиление поверхностного стока), растительный покров (вырубка лесов или за-

мена культур), а также механические свойства почв (уплотнение), что в совокупности увеличивает подверженность берегов размыву [5, 8, 33]. Аналогично, гидротехнические сооружения (дамбы, шпоры) способны стабилизировать отдельные участки, но перенаправляют энергию потока вниз по течению, создавая новые очаги эрозии [16, 24, 25]. Это демонстрирует ограниченность локальных мер стабилизации и необходимость бассейнового подхода к управлению речными системами.

Проблемы наблюдения и моделирования. Технологические достижения в мониторинге (LiDAR, UAV, спутниковая съемка) и процессном моделировании (BSTEM, SRH-2D) существенно расширили возможности наблюдения и анализа эрозионных процессов. Однако сохраняются проблемы:

- отсутствие унифицированных стандартов полевых измерений и совместимых форматов данных;

- высокая чувствительность моделей к параметрам грунтов и гидрологических условий, которые трудно точно определить;
- недостаточное представление динамики растительности и взаимодействия гидравлических и геотехнических процессов в существующих моделях [9, 19, 31].

Методы идентификации источников наносов полезны для масштабных оценок, но страдают от высокой вариабельности трассеров и низкого временного разрешения [32]. Все это затрудняет сравнение результатов различных исследований и ограничивает развитие кумулятивных знаний.

Роль растительности и инвазивных видов. Хотя роль растительности в укреплении берегов широко признана, факторы видовой специфичности и конкурентные взаимодействия между местными и инвазивными видами до сих пор недостаточно изучены. Новые исследования показывают, что глубина укоренения и прочностные характеристики корневых систем более точно предсказывают устойчивость откосов, чем общая биомасса [14]. Однако динамические модели, учитывающие сезонные изменения и инвазию чужеродных растений, практически отсутствуют.

Кумулятивные антропогенные воздействия. Особенно это касается развитых дельт, где совокупное воздействие инженерных вмешательств поднимает вопрос устойчивости всей системы [8, 34, 38]. Интеграция данных о землепользовании, инфраструктуре и режиме наносов в кросс-масштабные модели необходима для понимания пространственного перераспределения эрозионных рисков и долгосрочных последствий инженерных вмешательств [8, 34, 39].

Воздействие климатических изменений. Климатическая нестабильность и изменения гидрологического режима (усиление экстремальных паводков, смещение сезонного стока, деградация мерзлоты) фундаментально трансформируют динамику размыва берегов. Однако большинство существующих

моделей основываются на стационарных предположениях, что приводит к систематическому недооцениванию эрозионных рисков в будущем [3, 6, 40]. Особенно недооценена роль циклов промерзания – оттаивания в высокоширотных и высокогорных реках, где термальные процессы усиливают механизмы разрушения [3, 26].

Социально-экономические последствия. Наиболее серьезным пробелом остается недооценка социальных аспектов эрозии. Вынужденное переселение, потеря земель и инфраструктуры часто рассматриваются как внешние последствия, а не как часть системы «берег – человек». Отсутствие моделей, учитывающих социальную уязвимость, может приводить к неэффективным или несправедливым управленческим решениям [15, 38]. Необходимо интегрировать показатели плотности населения, прав собственности и адаптивного потенциала в сопряженные модели природных и социальных систем.

Таким образом, для развития науки о размыве берегов требуются междисциплинарный, динамический и инклюзивный подходы, основанные на:

- создании долгосрочных систем мониторинга и открытых баз данных;
- стандартизации методов измерений и моделирования;
- разработке динамических моделей с учетом климата, растительности и человеческой деятельности;
- совместной выработке решений с участием заинтересованных сторон.

Для оценки надежности основных утверждений, встречающихся в литературе по размыву берегов рек, был проведен анализ степени доказательной базы. В табл. 3 представлены ключевые тезисы, сила их подтверждения и основные источники.

Под «силой доказательной базы» в табл. 3 понимается качественная оценка уровня подтвержденности выводов по каждому механизму размыва на ос-

Табл. 3. Основные научные утверждения, степень их доказанности и поддерживающая литература

Table 3. Key scientific claims, evidence strength, and supporting literature

Утверждение / Claim	Сила доказательной базы / Evidence strength	Обоснование / Reasoning	Поддерживающие публикации / Papers
Турбулентность и гидравлические силы являются главными драйверами размыва берегов рек / Turbulence and hydraulic forces are the main drivers of riverbank erosion	Сильная (9/10) Strong (9/10)	Многочисленные исследования подтверждают ключевую роль турбулентности и касательных напряжений / Numerous studies confirm the dominant role of turbulence and shear stress	[1], [2], [6], [7], [9], [25]
Размыв берегов — значительный источник наносов и фосфора Riverbank erosion is a significant source of sediment and phosphorus	Сильная (8/10) Strong (8/10)	Высокий вклад береговой эрозии подтвержден эмпирически Empirical studies indicate major contributions of the riverbank erosion	[4], [5], [32], [35]

Утверждение / Claim	Сила доказательной базы / Evidence strength	Обоснование / Reasoning	Поддерживающие публикации / Papers
Методы моделирования и измерений улучшились, но остается недостаток стандартизации / Modeling and measurement methods are improved but lack standardization	Средняя (7/10) Moderate (7/10)	Существуют разнообразные методики без единых протоколов Diverse methods without unified protocols	[1], [9], [13], [19], [28], [31]
Антропогенные факторы усиливают эрозию / Anthropogenic factors intensify erosion	Средняя (7/10) Moderate (7/10)	Изменения землепользования связаны с ростом эрозии / Land-use change linked to increased erosion	[5], [8], [17], [18], [33], [34]
Биоинженерные методы эффективны при комбинировании / Bioengineering methods are effective if combined	Средняя (6/10) Moderate (6/10)	Эффективность зависит от условий участка / Effectiveness depends on site conditions	[16], [23–25], [36], [37]
Роль инвазивных видов и климата недостаточно изучена / Role of invasive species and climate change understudied	Слабая (3/10) Weak (3/10)	Имеются значительные научные пробелы / Substantial knowledge gaps remain	[3], [6], [14], [41]

нове типа и количества источников: 0 — единичные наблюдения/гипотезы; 1 — ограниченные лабораторные/полевые данные без независимой валидации; 2 — воспроизводимые результаты и согласование нескольких исследований; 3 — конвергенция полевых данных, лабораторных экспериментов и численного моделирования. Такая шкала введена для сопоставимости разнородных публикаций и не является «силой» в физическом смысле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Размыв берегов рек представляет собой многогранную экологическую и инженерную задачу, формируемую динамичным взаимодействием гидравлических сил, геотехнических свойств грунтов, растительности, изменений землепользования и климатической изменчивости. За последние десятилетия научное понимание этих процессов существенно углубилось благодаря развитию полевых методов, технологий дистанционного зондирования, процессно-ориентированных моделей и междисциплинарных подходов.

Обзор показал, что ни один из факторов или методов сам по себе не способен адекватно отразить всю сложность процессов размыва. Для точной диагностики и эффективного управления необходим системный подход, интегрирующий физические, биологические и социально-экономические аспекты.

Основными физическими драйверами остаются:

- турбулентные потоки и гидравлические напряжения;

- геотехническая неустойчивость откосов;
- взаимодействие с прибрежной растительностью.

Антропогенные факторы (землепользование, добыча песка, строительство дамб и шпор) все больше усиливают риски эрозии и усложняют ее прогнозирование.

Несмотря на прогресс, сохраняются существенные научные пробелы:

- отсутствие единых стандартов мониторинга и методик моделирования;
- недостаточный учет климатически обусловленной нестационарности гидрологии;
- слабая интеграция данных о растительности и инвазивных видах в модели;
- нехватка исследований социально-экономических последствий эрозии.

Для интеграции существующих знаний предлагается концептуальная модель, связывающая физические, экологические и социальные драйверы с методологическими достижениями и научными пробелами (рис. 5).

Предлагаемая концептуальная модель обобщает причинно-следственные связи между гидравлическими воздействиями потока, характеристиками берегового материала и наблюдаемыми формами деформаций. Числовые значения на рис. 5 интерпретируются как нормированные индексы (0–1) относительной выраженности факторов/механизмов (например, доля вклада или балльная оценка), вычисляемые на основе: диапазонов параметров из литературы; со-

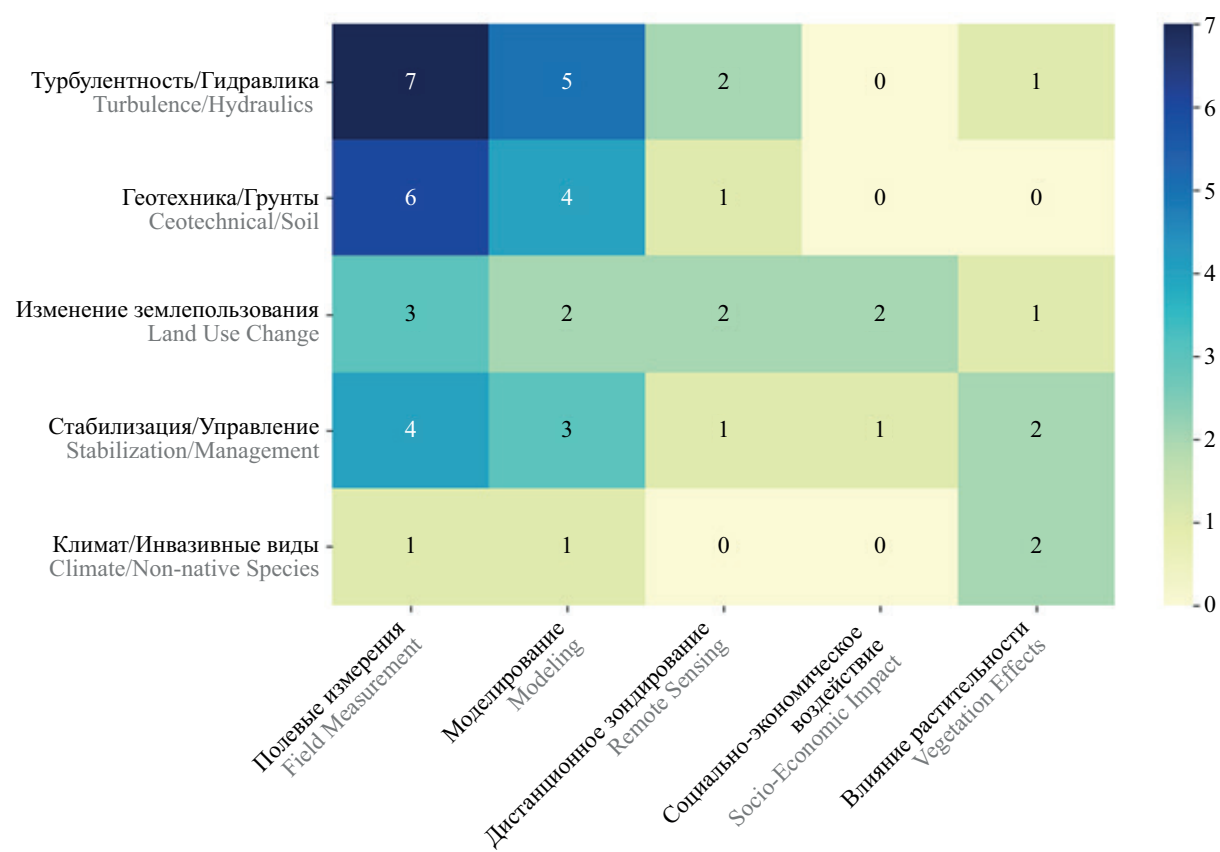


Рис. 5. Концептуальный синтез факторов размыва берегов рек и научные пробелы (составлено автором)
Fig. 5. Conceptual synthesis of riverbank erosion drivers and research gaps (compiled by the author)

Табл. 4. Ключевые исследовательские вопросы для будущих исследований
Table 4. Key research questions for future investigation

Вопрос исследования / Research question	Почему этот вопрос важен Why is this question important
Как взаимодействуют инвазивные виды растительности и климатические изменения, влияя на эрозию берегов How do invasive plant species interact with climate change to affect riverbank erosion?	Понимание этих процессов позволит уточнить механизмы размыва берегов и повысить эффективность адаптивного управления речными экосистемами в условиях изменения климата / Understanding these processes will help refine the mechanisms of riverbank erosion and improve the effectiveness of adaptive management of river ecosystems under climate change
Каковы долгосрочные социально-экономические последствия переселения из-за эрозии / What are the long-term socio-economic consequences of erosion-induced displacement?	Анализ этих последствий необходим для разработки научно обоснованных стратегий управления рисками и социальной адаптации населения в районах, подверженных эрозии берегов / An analysis of these consequences is essential for developing evidence-based strategies for risk management and social adaptation among populations living in areas prone to riverbank erosion.
Как стандартизировать методы измерения и моделирования эрозии / How can erosion measurement and modeling methods be standardized	Повысит сопоставимость исследований и точность моделей / This will enhance cross-study comparability and improve model accuracy

гласованности результатов разных типов исследований; условий применимости (тип русла, грансостав, гидрологический режим).

Практическое использование модели предполагает следующий порядок: 1) классификация участка (тип русла, кривизна, режим паводков); 2) сбор характеристик грунта (гранулометрия, связность, водонасыщение); 3) идентификация доминирующих гидродинамических воздействий (τ, вторичные течения, подмыв подошвы); 4) выбор вероятных механизмов

размыва и ожидаемых форм деформаций; 5) подбор методов мониторинга/расчета и мер защиты берега.

Открытые научные вопросы. Для определения направлений будущих исследований в области размыва берегов рек автор выделил ряд ключевых научных вопросов, требующих дальнейшего изучения.

Эти вопросы охватывают взаимодействие климатических изменений, динамику прибрежной растительности, социально-экономические последствия и необходимость стандартизации методов моделирования. В табл. 4 представлены ключевые исследовательские вопросы и обоснование их научной значимости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Das V.K., Debnath K. Understanding riverbank erosion through the lens of turbulence : a review. *Journal of Hydrology*. 2025; 649:132484. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132484. EDN KGOOXZ.
2. Zhao K., Coco G., Gong Zh., Darby S.E., Lanzoni S., Xu F. et al. A review on bank retreat: mechanisms, observations, and modeling. *Reviews of Geophysics*. 2022; 60(2). DOI: 10.1029/2021RG000761. EDN HVIACY.
3. Chassiot L., Lajeunesse P., Bernier J.-F. Riverbank erosion in cold environments : review and outlook. *Earth-Science Reviews*. 2020; 207:103231. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103231. EDN NSMKVU.
4. Fox G.A., Purvis R.A., Penn C.J. Streambanks: A net source of sediment and phosphorus to streams and rivers. *Journal of Environmental Management*. 2016; 181:602-614. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.06.071
5. Zaimes G.N., Tufekcioglu M., Schultz R.C. Riparian Land-Use Impacts on Stream Bank and Gully Erosion in Agricultural Watersheds: What We Have Learned. *Water*. 2019; 11(7):1343. DOI: 10.3390/W11071343
6. Ahmed M.N., Mohanadhas B. Review of the effect of river vegetation on sediment transport and river morphology and erosion prevention. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 2025; 31(2):398-408. DOI: 10.1080/09715010.2025.2471362. EDN YQPAQI.
7. Huai W.-X., Liu M.-Y., Yang Z.-H., Li S., Katul G.G. Flow dynamics and sediment transport in vegetated rivers : a review. *Journal of Hydrodynamics*. 2021; 33(3):400-420. DOI: 10.1007/s42241-021-0043-7. EDN GCLFTN.
8. Refat Faisal B.M., Hayakawa Y.S. Geomorphological processes and their connectivity in hillslope, fluvial, and coastal areas in Bangladesh : a review. *Progress in Earth and Planetary Science*. 2022; 9(1). DOI: 10.1186/s40645-022-00500-8. EDN NAQWHM.
9. Lawler D.M. The measurement of river bank erosion and lateral channel change : a review. *Earth Surface Processes and Landforms*. 1993; 18(9):777-821. DOI: 10.1002/ESP.3290180905
10. Aldefae A.H., Al-Khafaji R.A., Shamkhi M.S., Kumar H.Q. Erosion, sediments transport and riverbank stability : a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 901(1):012014. DOI: 10.1088/1757-899X/901/1/012014. EDN UVTNQY.
11. Rinaldi M., Darby S.E. 9 Modelling river-bank-erosion processes and mass failure mechanisms: Progress towards fully coupled simulations. *Developments in Earth Surface Processes*. 2007; 213-239. DOI: 10.1016/s0928-2025(07)11126-3
12. Fox G.A., Wilson G.V. The Role of Subsurface Flow in Hillslope and Stream Bank Erosion : a Review. *Soil Science Society of America Journal*. 2010; 74(3):717-733. DOI: 10.2136/SSSAJ2009.0319
13. Sutarto T.E. A Short Review on Various Techniques for Measuring Stream Bank Soil Erosion Strength. *2018 International Conference on Applied Science and Technology (iCAST)*. 2018; 252-258. DOI: 10.1109/ICAST1.2018.8751560
14. Hardwick Ja., Hackney Ch., Keen L., Fitzsimmons C., Willby N., Pattison Z. The role of non-native plant species in modulating riverbank erosion : a systematic review. *River Research and Applications*. 2025. DOI: 10.1002/rra.4420. EDN JCYNJG.
15. Das T.K., Halder S.K., Gupta I.D., Sen S. River Bank Erosion Induced Human Displacement and Its Consequences. *Living Reviews in Landscape Research*. 2014; 8. DOI: 10.12942/LRLR-2014-3
16. Hasan Md.Z., Toda Yu. Enhancing riverbank protection along the Jamuna river, Bangladesh: review of previous countermeasures and morphological assessment through groyne-based solutions using numerical modeling. *Water*. 2024; 16(2):297. DOI: 10.3390/w16020297. EDN RFPOBJ.
17. Park E. Sand mining in the Mekong delta: extent and compounded impacts. *Science of the Total Environment*. 2024; 924:171620. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171620. EDN LHDEFB.
18. Rentier E.S., Cammeraat L.H. The environmental impacts of river sand mining. *Science of the Total Environment*. 2022; 838:155877. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155877. EDN UGXTSH.
19. Klavon K., Fox G., Guertault L., Enlow H., Miller R., Khanal A., Langendoen E. Evaluating a process-based model for use in streambank stabilization: insights on the bank stability and toe erosion model (BSTEM). *Earth Surface Processes and Landforms*. 2017; 42(1):191-213. DOI: 10.1002/esp.4073. EDN YXCKKP.
20. Bolinaga C.C., Mittelstet A., Mankin K. Streambank erosion phenomena and understanding: current research and future directions. *Journal of the ASABE*. 2023; 66(5):1223-1228. DOI: 10.13031/ja.15613. EDN QKRGZO.
21. Calixto N., Castaño A., Contreras-Ropero J. Bibliometric analysis of river erosion control measures:

examination of practices and barriers in Colombia. *Hydrology*. 2024; 11(9):139. DOI: 10.3390/hydrology11090139. EDN RYEUZY.

22. Piégay H., Darby S.E., Mosselman E., Surian N. A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: a sustainable approach to managing bank erosion. *River Research and Applications*. 2005; 21(7):773-789. DOI: 10.1002/rra.881. EDN XSRMJS.

23. Bigham K.A. Streambank Stabilization Design, Research, and Monitoring: The Current State and Future Needs. *Transactions of the ASABE*. 2020; 63(2):351-387. DOI: 10.13031/trans.13647

24. Mandal A., Gautam H., Ahmad Z. Sediment control and flow redistribution with submerged vanes : a review. *Water Practice and Technology*. 2024; 19(5). DOI: 10.2166/wpt.2024.131. EDN SAKJGR.

25. Patel H.K., Arora S., Lade A.D., Kumar B., Azamathulla H.Md. Flow behaviour concerning bank stability in the presence of spur dike : a review. *Water Science and Technology: Water Supply*. 2023; 23(1):237-258. DOI: 10.2166/ws.2022.418. EDN SJNRZI.

26. Lawson D.E. *Erosion of perennially frozen streambanks*. 1983.

27. Chassiot L., Bernier J.F., Lajeunesse P. *Bank erosion processes within the fluvial corridor of the St. Lawrence River: causes, drivers and future challenges*. 2020. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-10061

28. Piégay H., Arnaud F., Belletti B., Bertrand M., Bizzi S., Carbonneau P. et al. Remotely sensed rivers in the anthropocene: state of the art and prospects. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2020; 45(1):157-188. DOI: 10.1002/esp.4787. EDN MZMKXV.

29. Lai Y.G. Advances in Geofluvial Modeling: Methodologies and Applications. *Advances in Water Resources Engineering*. 2015; 407-470. DOI: 10.1007/978-3-319-11023-3_9

30. Karydas C.G., Panagos P., Gitas I.Z. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics. *International Journal of Digital Earth*. 2012; 7(3):229-250. DOI: 10.1080/17538947.2012.671380

31. Andualem T.G., Hewa G.A., Myers B.R., Peters S., Boland J. Erosion and Sediment Transport Modeling : a Systematic Review. *Land*. 2023; 12(7):1396. DOI: 10.3390/land12071396. EDN ENNRGI.

32. Abbas G., Jomaa S., Rode M. *A review on share of river bank erosion to the total sediment load with increasing catchment size*. 2021. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-14536

33. Razali A., Syed ismail Sh.N., Awang S., Praveena S.M., Zainal abidin E. Land use change in highland area and its impact on river water quality : a review of case studies in Malaysia. *Ecological Processes*. 2018; 7(1):1-17. DOI: 10.1186/s13717-018-0126-8. EDN ZEOQAQ.

34. Islam Sk.R., Uddin R., Zannat M., Alam Ja. Ecological and geomorphic fallout of escalating river mining activities : a review. *Economic and Environmental Geology*. 2024; 57(3):293-303. DOI: 10.9719/eeg.2024.57.3.293. EDN AWKCRT.

35. Noe G.B., Cashman M.J., Skalak K., Gellis A., Hopkins K.G., Moyer D. et al. Sediment dynamics and implications for management: state of the science from long-term research in the Chesapeake bay watershed, USA. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. 2020; 7(4). DOI: 10.1002/wat2.1454. EDN OXTSFL.

36. Li M.H., Eddleman K.E. Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods. *Landscape and Urban Planning*. 2002; 60(4):225-242. DOI: 10.1016/S0169-2046(02)00057-9

37. Admiraal D. *Streambank stabilization using traditional and bioengineering methods : a literature review*. 2007.

38. Loucks D. Developed river deltas: Are they sustainable? *Environmental Research Letters*. 2019; 14(11):113004. DOI: 10.1088/1748-9326/ab4165

39. Chalov S., Moreido V., Urošev M., Golosov V., Zlatić M., Kasimov N. Advances in catchment and river erosion and pollutants' transport studies: From monitoring to modelling to management. *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY*. 2025; 17(4):6-9. DOI: 10.24057/2071-9388-2024-0608

40. Owens P. Soil erosion and sediment dynamics in the Anthropocene: A review of human impacts during a period of rapid global environmental change. *Journal of Soils and Sediments*. 2020; 20(12):4115-4143. DOI: 10.1007/s11368-020-02815-9

41. Castello L., Macedo M. Large-scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems. *Global Change Biology*. 2016; 22(3):990-1007. DOI: 10.1111/gcb.13173

Поступила в редакцию 7 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 5 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 6 марта 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: **Фам Нгок Тхинь** — кандидат технических наук, преподаватель; **Университет Туйлой**; г. Ханой, Вьетнам; SPIN-код: 5680-1089, Scopus: 57200407722, ORCID: 0000-0002-4928-6236; thinhtls@tlu.edu.vn.

Received August 7, 2025.

Adopted in revised form on March 5, 2026.

Approved for publication on March 6, 2026.

B I O N O T E S : **Pham Ngoc Thinh** — Candidate of Technical Sciences, lecturer; **Thuyloi University**; Hanoi, Vietnam; SPIN-code: 5680-1089, Scopus: 57200407722, ORCID: 0000-0002-4928-6236; thinhtls@tlu.edu.vn.

Биоинженерные сооружения как элемент управления
поверхностным стоком городских территорий

Юлия Александровна Рыльцева

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В средствах массовой информации регулярно появляется информация о затоплениях улиц городов, являющихся следствием климатических изменений, несоответствия пропускной способности систем водоотведения возникающим расходам дождевого стока или полного их отсутствия. Предмет исследования — процессы управления поверхностным стоком: сбор, регулирование отведения в централизованные системы канализации, очистка и возврат в водные объекты. Цель исследования состоит в оптимизации процессов обращения с поверхностным стоком в условиях городской среды посредством устройства биоинженерных сооружений.

Материалы и методы. Проведен аналитический обзор нормативных документов, результатов научно-исследовательских работ и опытно-конструкторских разработок (отечественных и зарубежных) по проблеме управления поверхностным стоком, формирующимся в условиях городской среды. Проанализированы сведения об эффективности очистки стока на биоинженерных сооружениях с целью оценки возможности выпуска очищенного стока в водные объекты.

Результаты. Косновным типам биоинженерных сооружений для управления поверхностным стоком относят: дождевые сады, озелененные кровли, гидроботанические площадки, биодренажные каналы. Объем вмещаемого стока такими сооружениями зависит от толщины почвогрунта, его состава, наличия или отсутствия дренажа. Эффективность очистки поверхностного стока в биоинженерных сооружениях по взвешенным веществам может составлять от 70 до 100 %, эффективность снижения показателей БПК — от 67 до 98 %, ХПК — от 70 до 92 %, нефтепродуктов — от 40 до 100 %. Задействование поверхностного стока для непитьевого водоснабжения города позволяет сократить потребление воды из централизованной системы водоснабжения на 30–60 %.

Выводы. Следует принимать во внимание, что оценка эффективности биоинженерных сооружений в вопросах аккумуляирования и очистки поверхностного стока должна устанавливаться индивидуально для каждого проектного решения для предотвращения негативного воздействия на окружающую среду.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: поверхностный сток, дождевой сток, биоинженерные сооружения, очистка поверхностного стока, фитоочистка, дождевой сад, биодренажная канава, гидроботаническая площадка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рыльцева Ю. А. Биоинженерные сооружения как элемент управления поверхностным стоком городских территорий // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 6. С. 976–990. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.976-990

Автор, ответственный за переписку: Юлия Александровна Рыльцева, ryiltsevayua@mgsu.ru.

Bioengineering structures as an element of surface runoff
management in urban areas

Yuliya A. Ryltseva

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

ABSTRACT

Introduction. Reports on the flooding of urban streets regularly appear in the mass media. Such flooding is caused by climate change, by the insufficient conveyance capacity of urban drainage systems relative to the stormwater runoff flow rates generated, or by the complete absence of such systems. The subject of the study is surface runoff management, including collection, regulation of discharge to centralized sewerage systems, treatment, and subsequent discharge to receiving water bodies. The aim of the study is to optimize surface runoff management in urban environments through the installation of bioengineering structures.

Materials and methods. The study included an analytical review of regulatory documents and the results of Russian and international research and development activities addressing the management of surface runoff generated in urban environments. Data on the treatment efficiency of bioengineering structures were analyzed to assess the feasibility of discharging treated surface runoff into receiving water bodies.

Results. The main types of bioengineering structures for surface runoff management include rain gardens, vegetated roofs, hydro-botanical sites, bioswales. The amount of runoff depends on the soil thickness, soil composition, and the presence

or absence of drainage. The removal efficiency for BOD ranged from 67 to 98 %, for COD — from 70 to 92 %, and for petroleum hydrocarbons — from 40 to 100 %. Using surface runoff for non-potable urban water supply can reduce demand on centralized water supply systems by 30–60 %.

Conclusions. It should be noted that the performance of bioengineered structures in terms of surface runoff retention and treatment should be assessed individually for each design solution in order to prevent adverse environmental impacts.

KEYWORDS: surface runoff, rain runoff, bioengineering structures, surface runoff treatment, phyto-purification, rain garden, bioswale, hydro-botanical site

FOR CITATION: Ryltseva Yu. A. Bioengineering structures as an element of surface runoff management in urban areas. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(6):976-990. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.976-990 (rus.).

Corresponding author: Yuliya A. Ryltseva, ryltsevayua@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Урбанизация современных городов неизбежно приводит к снижению водопроницаемости поверхностей их территорий. По данным исследования [1] общая площадь усовершенствованных дорожных покрытий и кровель в мегаполисах может составлять до 80 %, что вызывает образование больших объемов поверхностного стока, требующего организованного отведения. Задерживание стока на улично-дорожной сети (УДС) города может повлечь негативные последствия — наводнения, приводящие (в зависимости от масштаба) к нарушению нормального перемещения по городу автотранспорта и пешеходов, разрушение строительных конструкций инфраструктуры и гибель людей. Росту интенсивности атмосферных осадков способствуют также глобальные климатические изменения [2, 3]. Все чаще возникают ливневые дожди высокой интенсивности, получившие в публицистике название «сверхливни». Климатологи отмечают увеличение интервалов между осадками в умеренных широтах при возрастании их интенсивности и продолжительности выпадения. Особую актуальность управление поверхностным стоком имеет в регионах с муссонным климатом и сложным рельефом (большим перепадом высот), низменные участки которого подвергаются частым затоплениям даже при дождях средней интенсивности [4].

Вместе с тем отдельные регионы России терпят аридизацию климата, на фоне которой наблюдается катастрофическое снижение водности рек, являющихся источниками централизованного водоснабжения [5, 6]. Ярким примером служит Ростовская область, главная водная артерия которой — р. Дон обладает малой водностью с 2007 г. по настоящее время [7]. Не меньшее беспокойство вызывает обмеление Оки [8], Волги [9, 10], отдельные участки которых становятся несудоходными. Ученые сообщают о необходимости в подобной неблагоприятной экологической ситуации грамотного управления поверхностным стоком: его следует собирать и направлять в русла рек, минимизируя фильтрацию в подземные водоносные горизонты, в том числе в условиях недостаточной обеспеченности населенных пунктов системами централизованного отведения поверхностного стока. Для вододефицитных территорий

дождевой сток стоит рассматривать как альтернативный источник водоснабжения.

Все, обозначенное выше, является вызовом для инженеров, создающих системные технологии для управления поверхностным стоком.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поступление поверхностного стока в систему водоотведения характеризуется высокой неравномерностью. Преимущественно это относится к дождевому стоку, типовой гидрограф которого определяется быстрым возрастанием расхода в начале дождя до момента максимума, затем снижением расхода: сначала резким, потом медленным до достижения нулевых значений. Высокие значения интенсивности дождя вызывают необходимость обеспечения больших диаметров коллектора водоотведения в конце сети, организации насосных станций и очистных сооружений большой мощности. Избежать перечисленных последствий можно путем регулирования поступления поверхностного стока в водоотводящую сеть.

Проведен аналитический обзор действующей нормативной и методической документации (русской, зарубежной) в сфере обращения с поверхностным стоком. Для выявления лучших практик проанализированы результаты научной деятельности и опытно-конструкторских разработок специалистов в сфере водоотведения и градостроительства. Рассмотрены программные комплексы, применяемые для определения параметров сооружений регулирования и очистки поверхностного стока.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

К стандартным инженерным сооружениям, позволяющим регулировать поступление стока в коллекторы канализации, относят регулирующие резервуары, разделительные камеры, насосные станции. В рекомендациях НИИ ВОДГЕО¹ предлагаются сле-

¹ Мениутин Ю.А., Верещагина Л.М., Керин А.С., Фомичева Е.В., Логанова А.Ю. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты : методическое пособие. М., 2015.

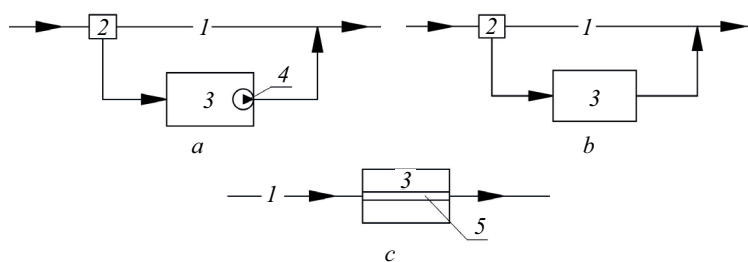


Рис. 1. Схемы регулирования поверхностного стока¹: *a* — схема 1; *b* — схема 2; *c* — схема 3; 1 — водоотводящий коллектор; 2 — разделительная камера; 3 — регулирующий резервуар; 4 — насосная установка; 5 — донный лоток

Fig. 1. Surface runoff control schemes¹: *a* — Scheme 1; *b* — Scheme 2; *c* — Scheme 3; 1 — stormwater collector; 2 — flow-splitting chamber; 3 — storage/control tank; 4 — pumping unit; 5 — bottom channel

дующие схемы регулирования поступления дождевого стока в системы водоотведения с использованием перечисленных сооружений.

Схема 1 (рис. 1, *a*) предполагает наличие на водоотводящем коллекторе разделительной камеры. Ее назначение состоит в отделении части расхода стока (превышающего предельное значение) в регулирующий резервуар. Опорожнение резервуара осуществляется посредством насоса, включающегося при достижении водой предельного уровня. Насос транспортирует сток с заданным постоянным расходом, не превышающим расчетного значения, на которое рассчитаны очистные сооружения.

Схема 2 (рис. 1, *b*) похожа на предыдущую, разница состоит в отсутствии насоса. Опорожнение резервуара производится в самотечном режиме по трубопроводу, диаметр которого не будет способствовать поступлению на очистные сооружения расхода, превышающего расчетное значение. Недостаток такой схемы заключается в необходимости значительного заглубления коллектора для подключения отводящего трубопровода резервуара.

Схема 3 (рис. 1, *c*) подразумевает доставку всего расхода в регулирующий резервуар, по всей длине которого предусмотрен донный лоток, соединяющийся с отводящим трубопроводом. Пропускная способность лотка рассчитывается на расход, не превышающий предельного значения. Избыток расхода задерживается в резервуаре до снижения интенсивности дождя.

Технические параметры элементов схем регулирования 1–3 могут быть рассчитаны по стандартным методикам (Свод правил², Рекомендации НИИ ВОДГЕО¹) или с применением специального программного обеспечения, разработанного российскими учеными [11, 12].

В качестве альтернативного решения по регулированию отведения поверхностного стока в системы водоотведения можно обозначить развитие водно-зеленой инфраструктуры городов. Комплекс таких природных ландшафтов направлен на повышение

уровня комфорта городской среды, в том числе за счет решения климатических проблем. Примером может быть концепция «город-губка» (Sponge City), которая впервые была предложена китайскими учеными в начале 2000-х гг. [13]. В других странах концепция имеет другие наименования: «Водно-ориентированный городской дизайн (WSUD)» в Австралии, «Природоохранные решения» в Европе, «Развитие с минимальным воздействием на окружающую среду (LID)» в США и Канаде [14]. Суть «города-губки» (и эквивалентных ему понятий) состоит в создании биоинженерных сооружений и ландшафтных зон, способных принимать, накапливать, очищать дождевую воду, возвращать ее в природные водные объекты (или, при необходимости, использовать) для предотвращения подтопления территорий в период интенсивных ливней.

Основными видами биоинженерных сооружений для управления поверхностным стоком являются: дождевые сады, озелененные крыши, гидроботанические площадки, биодренажные канавы. Во многих странах интеграция биоинженерных сооружений в городскую среду обязательна согласно нововведениям в градостроительную нормативную документацию [15, 16]. Российские своды правил в сфере инженерных систем^{2, 3} и градостроительства^{4, 5} рассматривают водно-зеленую инфраструктуру в вопросе обращения с поверхностным стоком не как обязательный, а как возможный элемент при соблюдении природоохранного законодательства.

Дождевой сад — элемент озеленения, представляющий собой пониженный участок рельефа, где собирается дождевая вода с крыши, дороги, улицы, и позволяющий воде впитаться в землю (определение согласно СП⁵). Конструкция дождевого сада, предложенная в методических рекомендациях Министерства строительства и жилищно-коммуналь-

³ СП 104.13330.2016. Инженерная защита территории от затопления и подтопления.

⁴ СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений.

⁵ СП 82.13330.2016. Благоустройство территорий.

² СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения.

ного хозяйства РФ⁶, представлена на рис. 2. Дождевой сад — это пониженные грунтовые территории, запроектированные для приема поверхностного стока. Дождевой сад предполагает почвенный слой высотой не менее 1 м для возможности выращивания крупной растительности. Под почвенным слоем предусматривается дренаж, состоящий из слоя гравия и песка (суммарной высотой не менее 0,3 м). Дренажный слой создается для обеспечения аккумуляции стока. Максимальное допустимое время пребывания стока в дренажном слое 72 ч, при большем времени возможно ухудшение санитарных характеристик местности, развитие насекомых. В зависимости от вида водоотведения дождевые сады подразделяются на инфильтрующие и неинфильтрующие. Инфильтрующие сады предусматривают конечную фильтрацию стока в естественный грунт. Такой вариант пригоден для грунтов с высоким коэффициентом фильтрации. Неинфильтрующие дождевые сады устраиваются на слабофильтрующих грунтах или при высоком уровне грунтовых вод. Такие сады предполагают наличие дренажных труб диаметром 100–150 мм, проложенных по основанию для отведения очищенного стока. В этом случае дождевые сады проектируются с гидроизоляционным слоем в боковых стенках и основании. К почвенному слою предъявляют ряд требований: он должен обладать высоким коэффициентом фильтрации, иметь достаточное для растений количество питательных веществ. Свойства почвы в целях повышения эффек-

тивности очистки поверхностного стока могут быть улучшены добавлением веществ с сорбционными или ионообменными свойствами (шунгит, торф, активированный уголь). Доля песка должна составлять 50–80 %, доля органического вещества 3–40 %, доля глинистых частиц допустима в интервале 3–25 %. Дождевые сады рекомендуется оборудовать переливным трубопроводом, обрез которого размещается на уровне максимального допустимого слоя осадков. Переливной трубопровод подключается к системе водоотведения. Эффективность очистки стока в дождевых садах по взвешенным веществам, органическим соединениям, нефтепродуктам и патогенным бактериям представлена в таблице. Эффективность очистки по металлам (медь, цинк, свинец) составляет от 93 до 98 %, по общему фосфору — от 70 до 83 %, по нитратам — от 68–80 %.

В работе [17] представлены варианты усовершенствованных дождевых садов для управления поверхностным стоком. Дождевой сад с резервуаром для фильтрации воды в грунт (рис. 3, а) позволяет временно накапливать дождевую воду в резервуаре, располагающемся под зелеными насаждениями, и постепенно пропускать ее в грунт-основание. Для организации дождевого сада рекомендуются почвенные субстраты, обладающие хорошей фильтрующей способностью, плодородностью. Кроме того, предполагается, что микроорганизмы, населяющие почвенный слой, будут принимать активное участие в биологической очистке стока. Предлагаются к посадке влаголюбивые виды растений (осока, папоротник, тростник), кустарники и невысокие деревья. Дренажная система резервуара должна обеспечивать

⁶ Методические рекомендации по организации водоотвода на улично-дорожной сети городов, не имеющих подземной (трубопроводной) ливневой канализации.

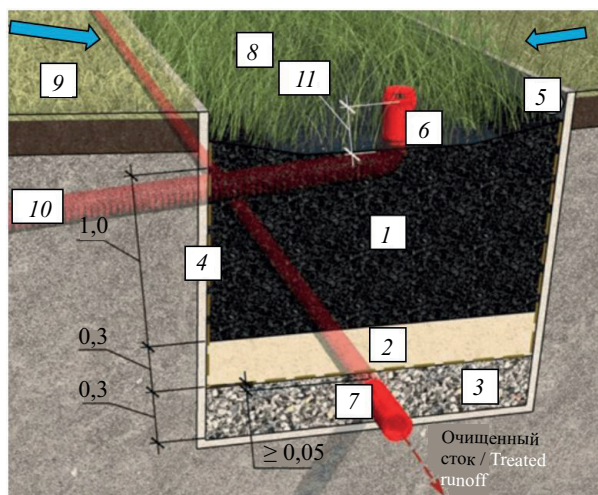


Рис. 2. Дождевой сад⁶: 1 — почвогрунт; 2 — песок; 3 — щебень; 4 — стена; 5 — геотекстиль; 6 — переливная труба; 7 — дренажная труба; 8 — растения; 9 — водосборная поверхность; 10 — водоотводящий трубопровод; 11 — допустимая высота слоя воды

Fig. 2. Rain garden⁶: 1 — planting soil; 2 — sand; 3 — crushed stone; 4 — wall; 5 — geotextile; 6 — overflow pipe; 7 — underdrain pipe; 8 — plants; 9 — catchment surface; 10 — outlet pipe; 11 — maximum allowable water depth

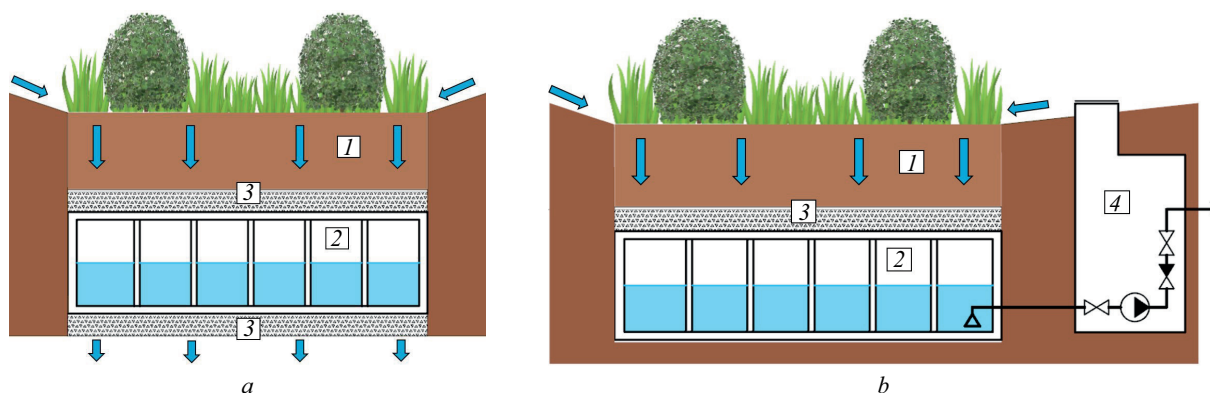


Рис. 3. Дождевой сад с резервуаром: *a* — с резервуаром для фильтрации воды в грунт; *b* — с резервуаром для накопления воды и насосной станцией; 1 — почвогрунт; 2 — резервуар; 3 — дренажный слой; 4 — насосная станция для перекачки поверхностного стока

Fig. 3. Rain garden with a tank: *a* — with an infiltration tank; *b* — with a storage tank and pumping station; 1 — planting soil; 2 — tank; 3 — drainage layer; 4 — pumping station for transferring surface runoff

медленную фильтрацию накопленного стока вглубь грунта-основания.

Дождевой сад с накоплением воды (рис. 3, *b*) предполагает возможность приема дождевого стока с прилегающих твердых покрытий в герметичный аккумулирующий резервуар для дальнейшего использования (полива зеленых насаждений, мытья УДС города, пополнения противопожарного запаса воды). Дождевой сад оснащается герметичным резервуаром. К нему подключается всасывающий трубопровод насосной станции, которая перекачивает сток на цели водоснабжения или в систему отведения поверхностного стока (при переполнении).

Большую популярность дождевые сады с резервуарами для накопления дождевой воды имеют на Тайване [18]. Их строительство было начато в 2019 г., а по состоянию на 2025 г. в республике функционирует 15 дождевых садов. Дождевые сады на Тайване выполняют три важнейшие функции: предупреждение подтоплений в период интенсивных дождей (среднее годовое количество осадков составляет 2500 мм), создание благоприятной городской среды в жаркий сезон (согласно данным полевого мониторинга температура почвы снижается на 2,4 °C), возможность использования собранной дождевой сточной воды для водоснабжения.

Положительный опыт разгрузки централизованной канализации путем создания дождевых садов имеется и в российских городах: Москве («Сад дождя» в Аптекарском огороде), Перми (проект «Зеленое кольцо»), Казани (водяные сады на берегу о. Кабан).

Нагрузка на дождевые сады будет определяться типом грунтов (их фильтрующей способностью), среднегодовой температурой воздуха. В исследовании [19] для проектирования дождевых садов предлагается использовать компьютерную гидрологическую модель DRAINMOD. По ряду исходных данных (интенсивность дождя, водосборная площадь, качественные показатели стока) она позволяет

определить необходимые размеры дождевого сада, требующуюся глубину почвенного слоя, а также эффективность очистки стока.

«Зеленые» (озелененные) крыши зданий и сооружений также являются элементом концепции «города-губки». Идея выращивания растений на крышах не нова: из античной истории известны висячие сады Семирамиды (рис. 4, *a*), имевшие эстетическую роль; в Норвегии с XVIII в. крыши зданий покрывали дерном, который защищал кровлю от повреждений и сноса в период сильных ветров, снижал потери тепла зимой (рис. 4, *b*). В части управления поверхностным стоком главная функция озелененной крыши — поглощение дождевой воды с целью предотвращения ее попадания в систему канализации и, как результат, снижение нагрузки на инженерную инфраструктуру города. К дополнительным преимуществам таких сооружений относят: создание для людей приятных мест отдыха и досуга; повышение ландшафтной привлекательности кровли при наблюдении с вышерасположенных отметок местности; продление срока службы изоляционного покрытия кровли; снижение теплопроводности кровли, что сокращает затраты на кондиционирование и обогрев воздуха в помещениях под ней; обеспечение дополнительной звукоизоляции, что может быть существенно в условиях городской среды; улучшение качества воздуха за счет фотосинтеза растений. По подсчетам экономистов оборудование «зеленой» крыши обходится дешевле, чем приобретение в собственность земельного участка для создания на нем зеленых насаждений. В странах, в которых поверхностный сток, отводимый в городскую канализацию, облагается налогом, создание «зеленых» кровель имеет особую актуальность. Согласно публикации [20] площадь крыш зданий и сооружений в современном мегаполисе может достигать 25 % общей территории, что обуславливает высокий потенциал задействования этих поверхностей при регулировании дождевого стока.



a



b

Рис. 4. Исторический опыт озеленения крыш⁷: *a* — висячие сады Семирамиды; *b* — крыши норвежских зданий
Fig. 4. Historical examples of green roofs⁷: *a* — the Hanging Gardens of Babylon; *b* — roofs of Norwegian buildings

В России устройство «зеленых» крыш постепенно приобретает популярность как в отношении жилых, так и общественных зданий (рис. 5). В жилых домах (повышенной этажности, высотных) объектами размещения озеленения чаще становятся стилобаты.

Устройство озелененных крыш в России нормируется ГОСТ Р 58875–2020⁸ и СП 17.13330⁹. Озелененная крыша имеет несколько слоев (рис. 6), каждый из которых выполняет определенную функцию.

Толщина субстрата, необходимого для выращивания растений, может быть различной и обуславливается типом озеленения:

- интенсивный: предполагает выращивание деревьев, кустарников и различных видов почво-

покровных растений, требующих постоянного ухода. Такой тип озеленения требует слоя субстрата высотой 300–700 мм;

- полуинтенсивный: предусматривает выращивание кустарников и почвопокровных растений при обеспечении периодического ухода. Данный тип озеленения требует слоя субстрата высотой 150–300 мм;

- экстенсивный: предполагает выращивание почвопокровных растений (мхи, травы, суккуленты), не требующих сложного ухода. Слой субстрата при этом может быть минимальным — 90–150 мм.

Предполагаемую высоту слоя субстрата следует учитывать при конструировании крыши в качестве дополнительной нагрузки на ее конструкции.

Особенно важно для озелененных крыш правильное водоотведение: в зависимости от высоты расположения крыши допускаются к устройству наружные и внутренние водостоки. При наличии наружных водостоков необходимо предотвращать зарастание водоприемных устройств травой, засорение субстратом, выносимым с озелененной поверхности.



a



b

Рис. 5. «Зеленая» крыша зданий г. Москвы: *a* — крыша административного здания, ул. Шереметьевская, д. 34⁷; *b* — крыша стилобата жилого комплекса, ул. Новочеремушкинская, д. 71/32 [21]

Fig. 5. Green roofs on buildings in Moscow: *a* — roof of an administrative building at 34 Sheremetyevskaya St.⁷; *b* — stylobate roof of a residential complex at 71/32 Novocheremushkinskaya St. [21]

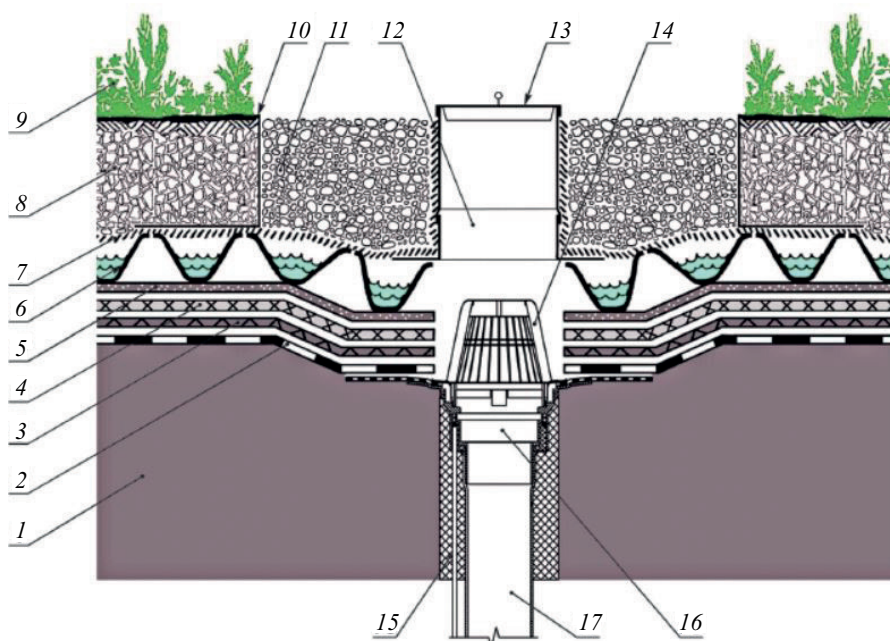


Рис. 6. Озелененная крыша⁸: 1 — несущая конструкция крыши; 2 — водоизоляционный слой; 3 — защитный слой; 4 — корнезащитный слой; 5 — влагонакопительный слой; 6 — дренажный слой; 7 — фильтрующий слой; 8 — субстрат; 9 — растительный слой; 10 — разделительный уголок; 11 — гравий; 12 — инспекционный колодец; 13 — надставной элемент; 14 — листвоуловитель воронки; 15 — герметик; 16 — корпус водоприемной воронки; 17 — водосток

Fig. 6. Green roof⁸: 1 — load-bearing roof structure; 2 — waterproofing layer; 3 — protective layer; 4 — root barrier layer; 5 — water-retention layer; 6 — drainage layer; 7 — filter layer; 8 — substrate; 9 — vegetation layer; 10 — separating edge profile; 11 — gravel; 12 — inspection chamber; 13 — extension element; 14 — roof-drain leaf guard; 15 — sealant; 16 — roof-drain body; 17 — downpipe

Водоприемными элементами внутренних водостоков являются водосточные воронки. Они должны обеспечивать возможность приема воды по всей толщине озелененной кровли. Наличие инспекционного колодца над воронкой позволяет осуществлять осмотр и очистку внутренней полости.

Зарубежными исследователями [22] доказана целесообразность применения биоугля, полученного в том числе при пиролизе осадков городских сточных вод, в составе почвенных смесей для озелененных крыш. Биоуголь (в количестве до 5 % по объему) способствует удержанию в почвенном слое биогенных элементов, необходимых для питания растений. Это обусловлено его высокой удельной площадью поверхности и адсорбционной способностью. Особенно целесообразно использование биоугля для кровель экстенсивного типа, высота почвенного слоя которых не превышает 150 мм. В целях экономии воды питьевого качества на нужды полива предлагаются к использованию предварительно очищенные на компактных установках «серые» сточные воды, образующиеся в здании (стоки от раковин, душевых, моек).

Интересен опыт озеленения крыш остановочных комплексов в г. Утрехте (Нидерланды)¹⁰: со-

общается об обновлении в 2019 г. 316 автобусных остановок. Их крыши были модернизированы и засажены суккулентными растениями (рис. 7) для решения ряда проблем, связанных с урбанизацией. Такие крыши обеспечивают впитывание дождевой воды, очищение воздуха, сохранение популяции пчел.

Гидробиотическая площадка (ГБП) — система из нескольких прудов (естественных или искусственных) с высшей водной растительностью, оборудованная подводящим и отводящим лотками, а также сорбирующими бонами для очистки воды от нефтепродуктов (рис. 8). Прообразом данных сооружений являются биопруды [23], возникшие в XIX в. для очистки (доочистки) городских сточных вод. Гидробиотическая площадка (рис. 8) устраивается в пониженном участке местности для приема стока с твердых дорожных покрытий. Лотком (канавой) сток подводится к буферному пруду, предназначенному для осаждения крупных фракций. Подводящий лоток оборудуется сороудерживающей решеткой для обеспечения процеживания воды и бонами из сорбирующего нефтепродукты материала. Буферный пруд, выполняющий роль аккумулятора и отстойника, соединен с ГБП, предусмотренной для биологической очистки поверхностного стока. В зоне ГБП осуществляются процессы очистки сточных вод — биологическое окисление, осаждение и сорбция. Эти процессы обеспечиваются сообществом

¹⁰ These bus stops are a sanctuary for bees. URL: <https://www.weforum.org/stories/2019/07/bees-can-take-refuge-on-these-bus-stop-green-roofs/>



Рис. 7. Крыша автобусной остановки в г. Утрехте (Нидерланды)¹⁰

Fig. 7. Bus stop roof in Utrecht (Netherlands)¹⁰

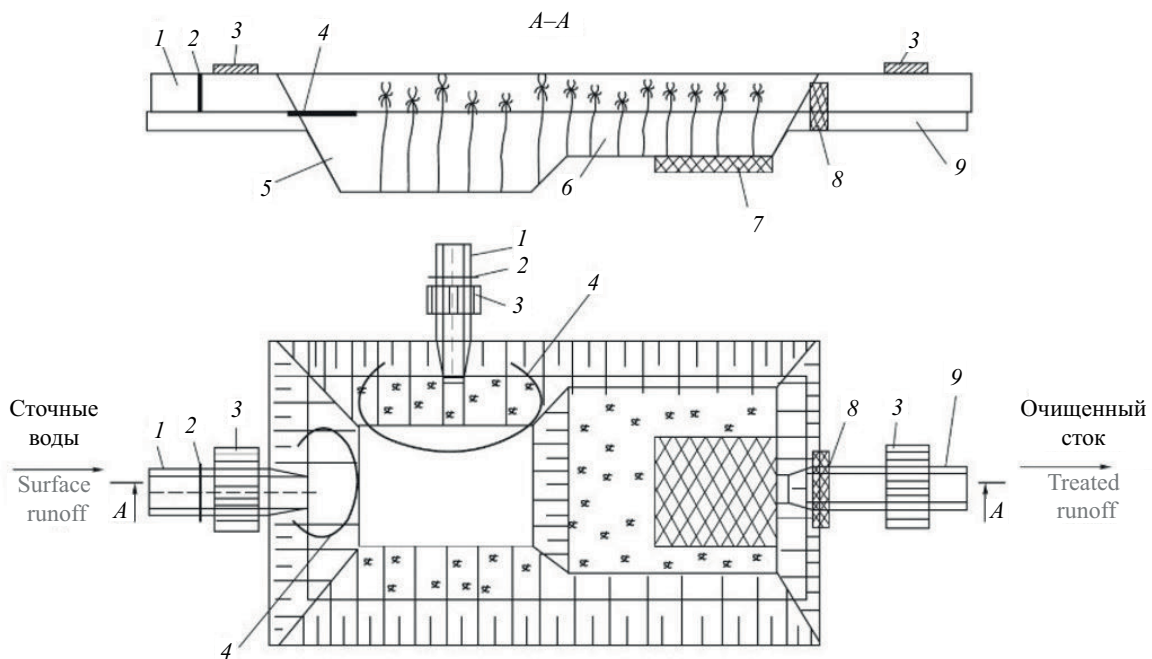


Рис. 8. Схема гидроботанической площадки с усиленной защитой от нефтепродуктов¹¹: 1 — подводящий лоток (канавка); 2 — решетка для улавливания плавающего мусора; 3 — мостки; 4 — плавающие бобы из сорбирующего нефтепродукты материала; 5 — буферный пруд для осаждения наиболее крупных фракций взвешенных веществ; 6 — основной пруд с высшей водной растительностью; 7 — площадка на дне пруда, выстланная слоем природных сорбентов; 8 — фильтрующая кассета с загрузкой природным сорбентом; 9 — отводящий лоток (канавка)

Fig. 8. Layout of a constructed wetland with enhanced protection against petroleum hydrocarbons¹¹: 1 — inlet channel (ditch); 2 — screen for retaining floating debris; 3 — walkways; 4 — floating booms made of oil-sorbent material; 5 — buffer pond for sedimentation of the coarsest fractions of suspended solids; 6 — the main pond with higher aquatic vegetation; 7 — a platform at the bottom of the pond, lined with a layer of natural sorbents; 8 — a filter cartridge loaded with natural sorbent; 9 — a drainage tray (ditch)

¹¹ ОДМ 218.8.005–2014. Методические рекомендации по содержанию очистных сооружений на автомобильных дорогах.

микроорганизмов, растительностью, почвенным слоем. Очистке стока способствуют природно-климатические факторы — солнечная радиация, аэрация. Площадка засаживается водной растительностью: ряской, эйхорнией, рогозом, камышом, тростником. На выпуске очищенного стока с площадки следует предусматривать боны из сорбирующего нефтепродукты материала, а также фильтрующую кассету, заполненную природным сорбентом. Сведения об эффективности очистки стока, прошедшего через ГБП, приведены в таблице.

Гидробиотическая площадка имеет много общего с фитоочистными сооружениями, подробно описанными в работе [24]. В зависимости от глубины расположения отводящего лотка (трубопровода) по отношению к поверхности земли, а также наличия или отсутствия дренажных труб в основании предлагается разделение фитоочистных сооружений на виды: со свободной водной поверхностью (лоток отводит очищенный сток от поверхности), с горизонтальным подповерхностным потоком (отводящий трубопровод отводит очищенный сток от уровня основания), с вертикальным подповерхностным потоком (отведение очищенного стока осуществляется дренажными трубами, проложенными в основании фитоочистного сооружения).

Биодренажная канава представляет собой небольшой по площади участок трапециевидного сечения глубиной до 1 м, засаженный растительностью (рис. 9). В низине площадки (под растительным слоем) предусматривается дренажная ниша, по дну которой проложен отводящий перфорированный трубопровод. Дренажный слой ниши выполняется из гравия, водоемкость дренажа принимается равной 40–45 % объема загрузки. Скорость движения стока по склонам канавы должна быть не более 0,8 м/с. Может быть целесообразно укрепление склона георешетками (геосетками). Согласно Своду правил⁵ ширина биодренажной канавы принимается не ме-

нее 2 м, глубина 0,2–1,0 м. Для почвенного слоя, высота которого должна быть не менее 150 мм, подходит чернозем, смешанный с песком. Биодренажная канава засаживается дикорастущей или специально подобранной растительностью с тонкими стеблями высотой 50–150 мм. Сообщается [25] о положительном опыте озеленения биодренажных канав такими растениями, как сныть, анемона, подорожник, клевер и герань. Необходимо, чтобы подобранная растительность соответствовала световым и климатическим особенностям места размещения. При ширине дренажной канавы не менее 30 м достигается следующая эффективность очистки стока в соответствии с методическими рекомендациями⁶: по металлам (кадмий, медь, цинк, свинец) — от 50 до 90 %, по общему фосфору — 9 %, по нитратам — 38 %. Эффективность очистки по прочим показателям представлена в таблице.

Российскими учеными [26] предлагается конструкция биофильтрационного модуля (рис. 10) — это две емкости, размещенные друг над другом. В первой емкости осуществляется накопление поверхностного стока, его фильтрация через почвенный слой, засаженный высшей водной растительностью. Сток, профильтровавшийся через почвенный слой и дренаж, через выпускное отверстие попадает в нижнюю емкость. В ней сток, протекая между вертикальными перегородками, фильтруется через сорбционные маты. Они способствуют дополнительному задержанию взвешенных веществ, органических примесей, нефтепродуктов и тяжелых металлов. Очищенный сток (по данным авторов изобретения) может быть отправлен в водоотводящую сеть, водоприемник или в аккумулирующую емкость для последующего использования воды.

В настоящее время ощущается нехватка руководящих документов, содержащих подробную информацию об эффективности очистки поверхностного стока посредством различных видов биоинженерных сооружений. Пожалуй, наибольшую ценность в данном вопросе имеют методические рекомендации Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ⁶. Сведения об эффективности очистки дождевого стока в биоинженерных сооружениях, основанные на методических рекомендациях, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, представлены в таблице. Очистка от взвешенных веществ обусловлена процессами седиментации и фильтрации. Биологическая очистка, осуществляемая преимущественно до глубины 40 см от поверхности земли, обусловлена седиментацией, процессами биосорбции и биоразложения (обеспечиваются микроорганизмами почвенного слоя), воздействием солнечной радиации. Большая роль в биологической очистке отводится корням и корневищам: вокруг них формируются аэробные зоны, необходимые для микроорганизмов. Тяжелые металлы и нефтепродукты выводятся из состава

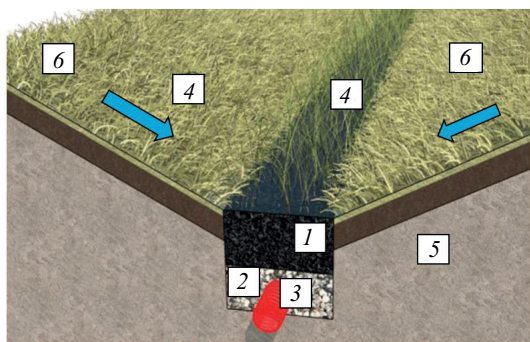


Рис. 9. Биодренажная канава⁶: 1 — фильтрующая загрузка; 2 — дренажный слой; 3 — отводящий трубопровод; 4 — растительность; 5 — естественный грунт; 6 — водосборная поверхность

Fig. 9. Bioswale⁶: 1 — filter media; 2 — drainage layer; 3 — outlet pipe; 4 — vegetation; 5 — native soil; 6 — catchment surface

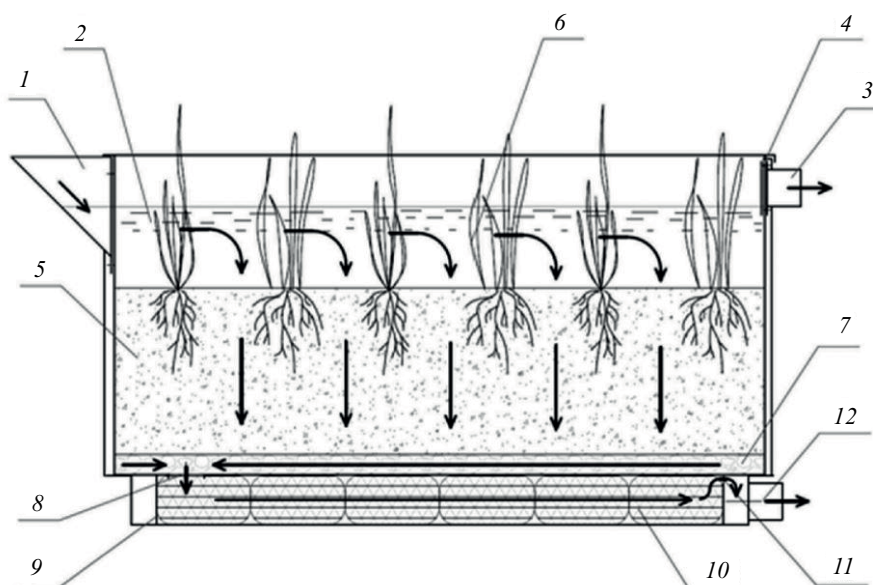


Рис. 10. Биофильтрационный модуль [26]: 1 — входной элемент; 2 — зона накопления стоков; 3 — переливной патрубков; 4 — сороудерживающая решетка; 5 — фильтрующая загрузка; 6 — корневая система высаженных растений; 7 — дренажный слой; 8 — выпускное отверстие; 9 — блок сорбционной доочистки; 10 — сорбционные маты; 11 — щелевой слив; 12 — отводящий патрубок

Fig. 10. Biofiltration module [26]: 1 — inlet element; 2 — runoff storage zone; 3 — overflow branch pipe; 4 — debris-retention screen; 5 — filter media; 6 — root system of the planted vegetation; 7 — drainage layer; 8 — outlet opening; 9 — sorption post-treatment unit; 10 — sorption mats; 11 — slot drain; 12 — outlet branch pipe

стока природными сорбентами — почвенным слоем и корнями растительности. В исследовании [27], информационно-техническом справочнике¹² сообщается, что фитоочистка поверхностного стока может производиться и в холодный период года: для этого необходимо мульчирование поверхности грунта природными органическими материалами — опилками, корой деревьев, сеном или торфом. Мульча способствует защите почвы и ее биоценоза от промерзания.

¹² ИТС 8–2015. Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях.

Согласно таблице сведения об эффективности очистки поверхностного стока в биоинженерных сооружениях, представленные в ряде информационных источников, расходятся. Показатели характеризуются широкими интервалами возможных значений, что, по всей вероятности, может быть обусловлено большим разнообразием конструктивных решений сооружений, различиями исходного качественного состава стока.

Сокращению объема образующегося поверхностного стока в условиях городской среды способствуют дренарующие дорожные покрытия [30]. Они рекомендуются для обустройства тротуаров, вело-

Сведения об эффективности очистки дождевого стока на биоинженерных сооружениях различных видов

Stormwater runoff treatment efficiency by bioengineering facilities of various types

Сооружение Facility	Эффективность очистки, % Treatment efficiency, %				
	Взвешенные вещества Suspended substances	БПК ₅ BOD	ХПК COD	Нефтепродукты Oil products	Патогенные бактерии Pathogenic bacteria
Дождевой сад Rain garden	90 ⁶	90 ⁶	–	75 ⁶	90 ⁶
	80–96 [28]	85–95 [28]	80–92 [28]	–	97–99 [28]
	70–100 [29]	–	–	70–100 [29]	70–100 [29]
Биодренажная канава Bioswale	81 ⁶	67 ⁶	–	62 ⁶	–
	70–95 [28]	85–95 [28]	70 [28]	–	97–99 [28]
	40–70 [29]	–	–	40–70 [29]	10–40 [29]

Сооружение Facility	Эффективность очистки, % Treatment efficiency, %				
	Взвешенные вещества Suspended substances	БПК ₅ BOD	ХПК COD	Нефтепродукты Oil products	Патогенные бактерии Pathogenic bacteria
Гидрботаническая площадка Hydro-botanical site	96–98 ¹²	90–92 ¹³	–	95–97 ¹²	–
Биопруд Biopond	90–98 [23]	60–98 [23]	–	–	–
Фитоочистное сооружение с горизонтальным подповерхностным потоком Phyto-purification facility with horizontal subsurface flow	83–95 [24]	92–98 [24]	90 [24]	–	98–99 [24]

рожек, площадей. Дренажные покрытия не сокращают пространство для мобильности, но в то же время не позволяют стоку скапливаться на поверхности. Примерами такого покрытия могут быть дренажный асфальтобетон, дренажный цементобетон [31], дренажная тротуарная плитка (в том числе предполагающая заполнение стыкового пространства мелким гравием), несплошная плитка с заполнением полости грунтом (рис. 11). В качестве основания под такие типы покрытий используется песок, гравий, щебень. Дренажные покрытия эффективны при небольшом уклоне поверхности стока (0,005 и менее).

Научно-технический прогресс последнего десятилетия направлен не только на внедрение биоинженерных сооружений для регулирования поступления поверхностного стока в системы водоотведения, но и на рассмотрение стока как ресурса — альтернативного источника водоснабжения. Особую актуальность использование дождевой воды имеет в вододефицитных регионах. Дождевая сточная вода [32], аккумулируемая в резервуарах, может на 30–60 % снизить

расход воды из системы питьевого централизованного водопровода. Задействование дождевого стока для водоснабжения предполагают российские своды правил по проектированию инженерных систем^{2, 14}.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Инженерные сети и сооружения для сбора, отведения и очистки поверхностного стока (или так называемая «серая» инфраструктура города согласно общемировой терминологии в сфере урбанистики) положительно зарекомендовали себя в практике обращения с атмосферными сточными водами в условиях городской среды. Однако с учетом того, что не все города в достаточной мере обеспечены системами отведения поверхностного стока, в условиях необходимости повышения комфортности микроклимата городской застройки целесообразным видится внедрение природных решений («водно-зеленой» инфраструктуры) для управления поверхностным стоком — биоинженерных систем, способных аккумулировать, очищать и возвращать сток в водные объекты.

¹³ Очистные сооружения для автодорог // Аргель. URL: <https://www.vo-da.ru/articles/ochistnyie-sooruzheniya-dlya-avtodorog/gidrobotanicheskie-ploschadki>

¹⁴ СП 253.1325800.2016. Инженерные системы высотных зданий.

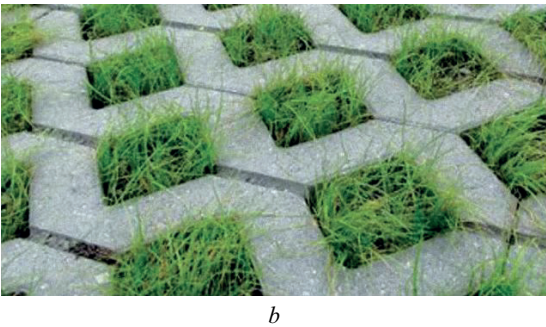
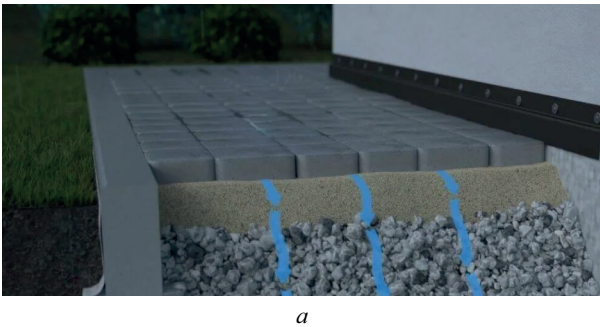


Рис. 11. Дренажные покрытия: а — бетонная плитка на фильтрующем основании; б — бетонная решетка (фото из открытых источников)

Fig. 11. Permeable pavements: а — concrete pavers on a filter base; б — concrete grid pavement (photograph from open sources)

Преимущества биоинженерных сооружений для регулирования поверхностного стока состоят в низких капитальных и эксплуатационных затратах, простоте функционирования и обслуживания, возможности гармоничной интеграции в ландшафт городской среды. Данные сооружения способствуют повышению устойчивости городской среды, ее экологической сбалансированности. Российская нормативно-техническая документация указывает на необходимость учета природоохранного законодательства при устройстве биоинженерных сооружений в населенных пунктах.

Эффективность очистки поверхностного стока на биоинженерных сооружениях следует устанавливать индивидуально для каждого проекта с учетом исходного качества стока, климатических показателей, параметров сооружения (габаритные размеры, влагоемкость и состав фильтрующего слоя, особен-

ности растительности). При выпуске очищенного стока с биоинженерного сооружения в водные объекты (категорий А, Б, В, Г) стоит учитывать достаточно строгие требования к концентрациям загрязняющих веществ, предъявляемые российским законодательством¹⁵.

Вероятно, проблема эффективного управления поверхностным стоком в условиях современных больших и малых городов может быть решена при объединении усилий инженеров в сфере водоотведения, очистки сточных вод и специалистов в области экоурбанистики.

¹⁵ Об утверждении технологических показателей наилучших доступных технологий в сфере очистки сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений или городских округов : Постановление Правительства Российской Федерации от 15.09.2020 № 1430.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сиваев С.Б., Абдуллаев А.М., Смирнов О.О., Залян Э.С., Андреева Е.С., Летуновский А.В. и др. Ливневая канализация в современном городе. От тарификации до инфильтрации : монография. М. : Высшая школа экономики, 2023. 120 с. DOI: 10.17323/978-5-7598-2797-9. EDN QSWKWI.
2. Sezer N., Koç M. A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting // Nano Energy. 2021. Vol. 80. P. 105567. DOI: 10.1016/j.nanoen.2020.105567. EDN ELPQPL.
3. Zhang J., Li Ch., Zhang X., Zhao T. Improving simulations of extreme precipitation events in China by the CMIP6 global climate models through statistical downscaling // Atmospheric Research. 2024. Vol. 303. P. 107344. DOI: 10.1016/j.atmosres.2024.107344. EDN XFMAPA.
4. Глухова К.А., Латишина Е.А. Современные технологии биоочистки поверхностных дождевых вод в структуре городской среды // Архитектура и дизайн: история, теория, инновации. 2022. № 6. С. 218–226. EDN BXJJFK.
5. Борисов А.В., Ельцов М.В., Удальцов С.Н., Бухонов А.В. Аридизация климата в пустынно-степной зоне: причины, формы проявления и влияние на жизнь древнего населения // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 4: История. Регионоведение. Международные отношения. 2018. Т. 23. № 3. С. 52–62. DOI: 10.15688/jvolsu4.2018.3.5. EDN XSQCMH.
6. Парфенова А.В., Дашкевич Л.В. Аридизация климата Ростовской области // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2021. Т. 1. № 6. С. 131–138. DOI: 10.23885/2500-395X-2021-1-6-131-138. EDN GTZPBC.
7. Крашенинников А.В., Садковская О.Е. Градостроительная реконструкция малых и средних городов с учетом изменения климата // Sciences of Europe. 2017. № 18–2 (18). С. 3–12. EDN ZHMUSH.
8. Дьяконов К.Н., Пыленок П.И., Харитонова Т.И. Водный режим Окской поймы в условиях изменения климата как фактор ограничения природопользования // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2024. Т. 79. № 5. С. 162–170. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.14. EDN GNLCEP.
9. Зайцев М.В., Шешнев А.С. Проблема изменения русла Волги у Саратова и попытки ее решения во второй половине XIX – начале XX века // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. Т. 86. № 5. С. 815–826. DOI: 10.31857/S2587556622050156. EDN TAJXNJ.
10. Болгов М.В., Беляев А.И. Водные проблемы Нижней Волги: основные факторы и компенсирующие мероприятия // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 862–874. DOI: 10.31857/S2587556623060031. EDN EZEJWU.
11. Патент RU № 2020618130. Программа определения параметров ливней на основе метеорологических данных / Игнатчик В.С., Игнатчик С.Ю., Саркисов С.В. и др.; заявл. № 2020617168 от 13.07.2020; опубл. 20.07.2020. Бюл. № 7. 1 с.
12. Патент RU № 2020618130. Программа «Поток 2020» для автоматизированного расчета систем сброса и отведения поверхностного стока с селитебных территорий и площадок предприятия, а также

для автоматизированного расчета производительности насосной станции для перекачки поверхностного стока в расчетном сечении / *Тингушова Е.А., Сухарева Л.Е., Ефимова М.Ю. и др.*; заявл. № 2020617203 от 07.07.2020; опубл. 20.07.2020. Бюл. № 7. 1 с.

13. *Yuan Yu., Zheng Ya., Zhai J., Huang X., Yao M., Shi J.* How does the sponge city pilot policy affect the urban water system climate resilience: Quasi-experimental evidence from China // *Urban Climate*. 2025. Vol. 64. P. 102643. DOI: 10.1016/j.uclim.2025.102643. EDN MAGPOP.

14. *Алтуни Г.В.* Дождевые сады как часть экологической и инженерной системы города // *Архитектурные исследования*. 2024. № 1 (37). С. 99–105. EDN OQFJQO.

15. *Дубино А.М.* Зарубежный опыт включения водно-зеленого каркаса в градостроительную документацию // *Архитектура и современные информационные технологии*. 2025. № 3 (72). С. 275–292. DOI: 10.24412/1998-4839-2025-3-275-292. EDN TAMVUU.

16. *Дубино А.М., Перькова М.В.* Анализ зарубежного опыта водосберегающего проектирования городских территорий // *Техническая эстетика и дизайн-исследования*. 2021. Т. 3. № 3. С. 24–33. DOI: 10.34031/2687-0878-2021-3-3-24-33. EDN VNQDVY.

17. *Харитонов А.С., Франкиев Е.Е.* Концепция «город-губка». Адаптация ливневой канализации к изменениям климата // *Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения*. 2025. № S1. С. 186–194. EDN XLDTUH.

18. *Chen Ch.F., Chen Yi.W., Lin Ch.H., Lin J.Ya.* Field performance of 15 rain gardens in different cities in Taiwan // *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 947. P. 174545. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174545. EDN OQKOUQ.

19. *Li J., Liu F., Li Ya.* Simulation and design optimization of rain gardens via DRAINMOD and response surface methodology // *Journal of Hydrology*. 2020. Vol. 585. P. 124788. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124788. EDN FTRIBB.

20. *Croce S., Vettorato D.* Urban surface uses for climate resilient and sustainable cities: A catalogue of solutions // *Sustainable Cities and Society*. 2021. Vol. 75. P. 103313. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103313. EDN UKQGBR.

21. *Шонина Н.А.* Зеленая крыша каменных джунглей // *Сантехника*. 2011. № 6.

22. *Petreje M., Sněhota M., Chorazy T., Novotný M., Rybová B., Hečková P.* Performance study of an innovative concept of hybrid constructed wetland-extensive

green roof with growing media amended with recycled materials // *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 331. P. 117151. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.117151. EDN FZYKJW.

23. *Яковлев С.В., Воронов Ю.В.* Водоотведение и очистка сточных вод : учебное пособие. М. : Издательство АСВ, 2002. 704 с. EDN TBDTV L.

24. *Щеголькова Н.М., Диас В., Криксунов Е.А., Рыбка К.Ю.* Фито-системы для очистки сточных вод: современное решение экологических проблем // *Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения*. 2015. № 2. С. 50–59. EDN XRHNMH.

25. *Витюк Е.Ю.* Биодренажные канавы и дождевые сады как инструмент благоустройства современного города // *Архитектон: Известия вузов*. 2022. № 3 (79). DOI: 10.47055/1990-4126-2022-3(79)-11. EDN RUDKSF.

26. Патент RU № 2791881. Биофильтрационный модуль для очистки поверхностного стока и способ его работы / *Саянов А.А., Шукин И.С.*; заявл. № 2022115145 от 08.07.2022; опубл. 14.03.2023. Бюл. № 8. 14 с.

27. *Графкина М.В., Витковский Д.В.* Некоторые аспекты проектирования фитоочистных сооружений // *Управление техносферой*. 2023. Т. 6. № 2. С. 158–169. DOI: 10.34828/UdSU.2023.72.29.003. EDN UMQMGR.

28. *Брешиани Р.* Фитоочистка как инновационный метод водоочистки // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 7. С. 885–900. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.885-900. EDN UBHFBA.

29. *Зайкова Е.Ю., Феофанова С.С.* Зеленая инфраструктура как инструмент управления ливневыми водами // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. № 11. С. 1429–1452. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1429-1452. EDN AIPUNV.

30. *Дергунова А.В., Пиксайкина А.А.* Применение пористых тротуаров в создании инфраструктуры городской среды // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 12 (123). С. 1440–1447. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.12.1440-1447. EDN YTATFJ.

31. *Маткин А.А., Бикбай М.Я.* Дренирующий бетон КАПСИМЭТ и новое оборудование для строительства дорог и инженерных сооружений // *Строительные материалы*. 2022. № 5. С. 45–51. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-802-5-45-51 EDN ZCTACI.

32. *Santos C., Taveira-Pinto F.* Analysis of different criteria to size rainwater storage tanks using detailed methods // *Resources, Conservation and Recycling*. 2013. Vol. 71. Pp. 1–6. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.11.004

Поступила в редакцию 22 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 29 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: **Юлия Александровна Рыльцева** — кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 4138-6634, Scopus: 57214228101, ORCID: 0000-0002-1315-6907; yuliya.ryltseva@mail.ru.

REFERENCES

1. Sivaev S.B., Abdullaev A.M., Smirnov O.O., Zalyan E.S., Andreeva Ye.S., Letunovskii A.V. et al. *Storm sewers in a modern city. From billing to infiltration*. Moscow, Higher School of Economics, 2023; 120. DOI: 10.17323/978-5-7598-2797-9. EDN QSWKWI. (rus.).
2. Sezer N., Koç M. A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting. *Nano Energy*. 2021; 80:105567. DOI: 10.1016/j.nanoen.2020.105567. EDN ELPQPL.
3. Zhang J., Li Ch., Zhang X., Zhao T. Improving simulations of extreme precipitation events in China by the CMIP6 global climate models through statistical downscaling. *Atmospheric Research*. 2024; 303:107344. DOI: 10.1016/j.atmosres.2024.107344. EDN XFMAPA.
4. Glukhova K., Lapshina E. Modern technologies for bio-treatment of surface rain water in the structure of the urban environment. *Architecture and design: history, theory, innovation*. 2022; 6:218-226. EDN BXJFK. (rus.).
5. Borisov A.V., Eltsov M.V., Udaltsov S.N., Bukhonov A.V. Climate aridization in the desert-steppe zone: the causes, results and impact on life of the ancient population. *Science Journal of Volgograd State University. History. Area Studies. International Relations*. 2018; 23(3):52-62. DOI: 10.15688/jvolsu4.2018.3.5. EDN XSQCMH. (rus.).
6. Parfenova A.V., Dashkevich L.V. Aridization of the climate of the Rostov region. *Ecology. Economy. Informatics. System Analysis and Mathematical Modeling of Ecological and Economic Systems*. 2021; 1(6):131-138. DOI: 10.23885/2500-395X-2021-1-6-131-138. EDN GTZPBC. (rus.).
7. Krashenninnikov A.V., Sadkovskaya O.E. Reconstruction of the small cities of the Rostov region with consideration for climate change. *Sciences of Europe*. 2017; 18-2(18):3-12. EDN ZHMUSH. (rus.).
8. Diakonov K.N., Pylenok P.I., Kharitonova T.I. Water regime of the Oka river floodplain under climate change as a factor limiting nature management. *Lomonosov Geography Journal*. 2024; 79(5):162-170. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.14. EDN GNLCEP. (rus.).
9. Zaytsev M.V., Sheshnev A.S. The problem of Volga riverbed changing near Saratov and attempts to solve it in the second half of the 19th – early 20th century. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*. 2022; 86(5):815-826. DOI: 10.31857/S2587556622050156. EDN TAJXHJ. (rus.).
10. Bolgov M.V., Belyaev A.I. Water problems of the lower Volga: main factors and compensating measures. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*. 2023; 87(6):862-874. DOI: 10.31857/S2587556623060031. EDN EZEJWU. (rus.).
11. Patent RU No. 2020618130. *A program for determining rainfall parameters based on meteorological data* / Ignatchik V.S., Ignatchik S.Yu., Sarkisov S.V. appl. No. 2020617168 / 13.07.2020; publ. 20.07.2020. Byul. No. 7; 1. (rus.).
12. Patent RU No. 2020618130. *The Potok 2020 program for the automated calculation of surface runoff discharge and discharge systems from residential areas and sites of the enterprise, as well as for the automated calculation of the pumping station capacity for pumping surface runoff in the design section* / Tingushova E.A., Sukhareva L.E., Efimova M.Yu. No. 2020617203 / 07.07.2020; publ. 20.07.2020. Byul. No. 7; 1. (rus.).
13. Yuan Yu., Zheng Ya., Zhai J., Huang X., Yao M., Shi J. How does the sponge city pilot policy affect the urban water system climate resilience: Quasi-experimental evidence from China. *Urban Climate*. 2025; 64:102643. DOI: 10.1016/j.uclim.2025.102643. EDN MAGPOP.
14. Altunin G.V. Rain gardens as part of the city ecological and engineering system. *Architectural Research*. 2024; 1(37):99-105. EDN OQFJQO. (rus.).
15. Dubino A.M. International experience in integrating blue-green infrastructure into urban planning documentation. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2025; 3(72):275-292. DOI: 10.24412/1998-4839-2025-3-275-292. EDN TAMVUU. (rus.).
16. Dubino A., Per'kova M. Analysis of foreign experience in water-saving design of urban territories. *Technical Aesthetics and Design Research*. 2021; 3(3):24-33. DOI: 10.34031/2687-0878-2021-3-3-24-33. EDN VNQDVY. (rus.).
17. Kharitonov A.S., Frankiv Ye.E. Adaptation of storm sewers to climate change. *The best available water supply and sanitation technologies*. 2025; S1:186-194. EDN XLDTUH. (rus.).
18. Chen Ch.F., Chen Yi.W., Lin Ch.H., Lin J.Ya. Field performance of 15 rain gardens in different cities in Taiwan. *Science of The Total Environment*. 2024; 947:174545. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174545. EDN OQKOUQ.
19. Li J., Liu F., Li Ya. Simulation and design optimization of rain gardens via DRAINMOD and response surface methodology. *Journal of Hydrology*. 2020; 585:124788. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124788. EDN FTRIBB.

20. Croce S., Vettorato D. Urban surface uses for climate resilient and sustainable cities: A catalogue of solutions. *Sustainable Cities and Society*. 2021; 75:103313. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103313. EDN UKQGBR.
21. Shonina N.A. The green roof of the stone Jungle. *Plumbing*. 2011; 6. (rus.).
22. Petreje M., Sněhota M., Chorazy T., Novotný M., Rybová B., Hečková P. Performance study of an innovative concept of hybrid constructed wetland-extensive green roof with growing media amended with recycled materials. *Journal of Environmental Management*. 2023; 331:117151. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.117151. EDN FZYKJW.
23. Yakovlev S.V., Voronov Yu.V. *Wastewater disposal and treatment*. Moscow, ASV Publishing House, 2002; 704. EDN TBDTV. (rus.).
24. Shchegolkova N.M., Dias V., Kriksunov Ye.A., Ribka K.Yu. Phyto-systems for wastewater treatment: a modern solution to environmental problems. *The best available water supply and sanitation technologies*. 2015; 2:50-59. EDN XRHNMH. (rus.).
25. Vitiuk E.Yu. Biodrainage ditches and rain gardens as improvement tools in a modern city. *Architecton: Proceedings of Higher Education*. 2022; 3(79). DOI: 10.47055/1990-4126-2022-3(79)-11. EDN RUDKSF. (rus.).
26. Patent RU No. 2791881. *Biofiltration module for treatment of surface runoff and method of its operation* / Saianov A.A., Shchukin I.S. No. 2022115145 / 08.07.2022; publ. 14.03.2023. Byul. No. 8; 14. (rus.).
27. Grafkina M.V., Vitkovsky D.V. Some aspects of designing phytotreatment facilities. *Management of the Technosphere*. 2023; 6(2):158-169. DOI: 10.34828/UdSU.2023.72.29.003. EDN UMQMGR. (rus.).
28. Bresciani R. Constructed wetland technology as an innovative water treatment method. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(7):885-900. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.885-900. EDN UBHFBA. (rus.).
29. Zaykova E.Yu., Feofanova S.S. Green infrastructure as a stormwater management tool. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1429-1452. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1429-1452. EDN AIPUNV. (rus.).
30. Dergunova A.V., Piksaykina A.A. The use of porous pavements in creating the infrastructure of the urban environment. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(12):1440-1447. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.12.1440-1447. EDN YTATFJ. (rus.).
31. Matkin A.A., Bikbau M.Ya. Drainage concrete KAPSIMET and new equipment for the construction of roads and engineering structures. *Construction Materials*. 2022; 5:45-51. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-802-5-45-51 EDN ZCTACI. (rus.).
32. Santos C., Taveira-Pinto F. Analysis of different criteria to size rainwater storage tanks using detailed methods. *Resources, Conservation and Recycling*. 2013; 71:1-6. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.11.004

Received December 22, 2025.

Adopted in revised form on December 29, 2025.

Approved for publication on January 29, 2026.

B I O N O T E S : **Yuliya A. Ryltseva** — Candidate of Technical Sciences, lecturer of the Department of Water supply and water removal; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 4138-6634, Scopus: 57214228101, ORCID: 0000-0002-1315-6907; yuliya.ryltseva@mail.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 628.1

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.991-1000

Минимизация рисков при обосновании структуры и параметров перспективных систем подачи и распределения воды

Виктор Романович Чупин¹, Иванны Александровна Абросимова^{1,2},
Роман Николаевич Ярыгин^{1,3}

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ);
г. Иркутск, Россия;

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

³ Научно-производственное предприятие «Гидрикс» (НПП «Гидрикс»); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Системы водоснабжения — стратегически важные, энергозатратные, капиталоемкие и инерционные системы. Все эти свойства приводят к практически полному отсутствию адаптационных механизмов для оптимизации условий эксплуатации данных систем. Причиной нарушения водоснабжения являются непредсказуемость развития систем и отсутствие алгоритмов определения вероятности миграции населения, уровня удельного водопотребления и аварийности. К ярким примерам таких ошибок можно отнести групповые водопроводы, построенные более 60 лет назад. В связи с оттоком населения и индустриализацией большое количество водопроводов продолжает оставаться «в земле», но не эксплуатируются, так как нет потребителей. Одновременно с этим существуют перегруженные системы больших городов и мегаполисов из-за активной точечной застройки, приводящей к несбалансированности инженерных систем. Парадоксально, но статистика за последние 20 лет показывает понижение уровня удельного водопотребления почти в два раза.

Материалы и методы. Предлагается при разработке перспективных схем водоснабжения учитывать неопределенность потребления воды, удельную стоимость электроэнергии в будущих периодах строительства систем водоснабжения и выбирать траектории их развития с минимальными экономическими и технологическими рисками.

Результаты. С помощью составления матрицы критериев принятия решения можно выбрать параметры перспективной системы водоснабжения в условиях неопределенности численности населения, удельных нагрузок водоснабжения, удельной стоимости электроэнергии и др.

Выводы. Следует переходить к многовариантному проектированию и рассматривать водопотребление, численность населения, стоимость электроэнергии как нечеткие и неопределенные значения и выбирать из них те, которые обеспечивают минимальные риски по стоимости их жизненного цикла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: системы подачи и распределения воды, неопределенность в численности населения и водопотребления, выбор предпочтительного варианта строительства и реконструкции систем водоснабжения, матрица рисков, стоимость жизненного цикла, критерии принятия решения, водопроводные системы, эксплуатация и проектирование водопроводных систем, удельное водопотребление, электропотребление

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чупин В.Р., Абросимова И.А., Ярыгин Р.Н. Минимизация рисков при обосновании структуры и параметров перспективных систем подачи и распределения воды // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 6. С. 991–1000. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.991-1000

Автор, ответственный за переписку: Иванны Александровна Абросимова, abrosimovaia@mgsu.ru.

Risk-Based Justification of the Structure and Parameters of Advanced Water Supply and Distribution Systems

Viktor R. Chupin¹, Ivanna A. Abrosimova^{1,2}, Roman N. Yarygin^{1,3}

¹ Irkutsk National Research Technical University (INRTU); Irkutsk, Russian Federation;

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

³ Research and Production Enterprise Hydrix; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Water supply systems are strategically important, energy-intensive, capital-intensive, and highly inertial systems. These characteristics result in a virtually complete lack of adaptive mechanisms for optimizing their operating condi-

tions. Water supply disruptions are caused by the unpredictability of system development patterns and by the lack of algorithms for determining the probability of population migration tracks, specific water consumption and system failure rates. Demonstrative examples of such errors include group water supply systems built more than 60 years ago. Due to population outflow and industrial decline, many water supply systems remain underground but are no longer operated because of insufficient consumer demand. At the same time, systems in large cities and megalopolises are overloaded because of active infill development, which causes imbalances in utility networks. Paradoxically, statistics for the past 20 years show that specific water consumption has decreased by almost half.

Materials and methods. When designing advanced water supply schemes, uncertainties related to future water demand and electricity unit costs should be considered, and system development trajectories that minimize economic and technological risks should be selected.

Results. A decision-making criteria matrix can be applied to select the parameters of a future water supply system under conditions of uncertainty related to population size, unit water demand, electricity costs, and other factors.

Conclusions. A multivariant design approach should be adopted, treating water consumption, population size, and electricity cost as fuzzy and uncertain variables and selecting options that minimize life-cycle cost risks.

KEYWORDS: water supply and distribution systems, uncertainty in population size and water consumption, selection of the preferred option for construction and reconstruction of water supply systems, risk matrix, life-cycle cost, decision-making criteria, water supply networks, operation and design of water supply systems, specific water consumption, electricity consumption

FOR CITATION: Chupin V.R., Abrosimova I.A., Yarygin R.N. Risk-Based Justification of the Structure and Parameters of Advanced Water Supply and Distribution Systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(6):991-1000. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.991-1000 (rus.).

Corresponding author: Ivanna A. Abrosimova, abrosimovaia@mgssu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что проектирование — процесс, позволяющий создать еще не существующий объект. Объект надо запроектировать так, чтобы он функционировал в предстоящих периодах его эксплуатации, а будущее неопределенно и его нельзя выразить детерминированными значениями (это основное противоречие проектирования). Градостроители и разработчики мастер-планов уже столкнулись с тем, что вместо того, чтобы развивать системы водоснабжения, их необходимо консервировать и выводить из строя отдельные неэффективные участки и сооружения. На этом фоне за счет энергосберегающей политики продолжает снижаться удельное водопотребление, и когда оно стабилизируется или снова начнет расти трудно прогнозировать [1–3].

В основе существующей методики проектирования систем водоснабжения лежат знания о расчетных нагрузках водоснабжения, которые вычисляются на базе их удельных значений (для жилищного сектора — это удельное потребление воды на одного человека в сутки). Такие значения представлены в СП 31.13330.2021 в виде интервала 165–180 л/чел в сут. Причем эти цифры за последние годы менялись несколько раз (в СНиП 2.04.02–84 предлагались нормы 230–350 л/чел в сут, в СП 31.13330.2010 — 220–280 л/чел в сут, а в СП 31.13330.2012 — 195–220 л/чел в сут). Согласно Градостроительному кодексу (ГрК) 2023 и Постановлению Правительства РФ от 05.09.2013 № 782 «О схемах водоснабжения и водоотведения» схемы водоснабжения и водоотведения разрабатываются на период не менее 10 лет. Однако, что будет через 10 лет, будет удельное потребление воды также уменьшаться, или начнет увеличиваться, невозможно точно определить и спрогнозировать. Даже если пользоваться последним СП 31.13330.2021, где рекомендуются не конкрет-

ные числа, а интервал значений удельных расходов, 165–180 л/чел в сут, какое значение из них принимать в расчеты, рекомендации отсутствуют. При этом проектировщики должны понимать, что риски, которые возникают в случае завышения или занижения расчетных нагрузок, очень велики, поскольку в том и в другом случае потребуются реконструкция и огромные финансовые вложения [4–11].

Отдельного внимания заслуживает вариативность в стоимости электроэнергии, которая существенно изменяется как во времени, так и по территориям нашей страны. В настоящее время стоимость электроэнергии имеет широкий диапазон и изменяется от 2 руб/кВт·ч в Иркутской области (г. Иркутск) до 30 руб/кВт·ч в Чукотском автономном округе (г. Анадырь). Возникает вопрос, какую стоимость электроэнергии принимать в расчетах проектировщикам. Затруднительно, но от стоимости зависят параметры насосных станций и диаметры трубопроводов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работах [12–14] на основе стоимости жизненного цикла (ЖЦ) определены оптимальные скорости движения сточной жидкости в напорных трубопроводах и получена следующая формула для расчета диаметра трубопровода из полиэтиленовых труб марки ПЭ 100 SDR 17:

$$d = 0,477 \cdot x_i^{0,24} \cdot z_i^{0,143} \cdot T_i^{0,072}, \quad (1)$$

где x — расход воды, м³/с; z — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии; T — время жизненного цикла, годы.

Используя формулу (1) для полиэтиленовых труб марки ПЭ 100 SDR 17 со сроком службы 100 лет, для расхода воды 0,5 м³/с можно получить различные значения теоретических диаметров, представленные в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что оптимальные диаметры напорных трубопроводов в зависимости от стоимо-

Табл. 1. Значения оптимальных диаметров для различных регионов страны
Table 1. Optimal diameters for different regions of the country

Административные центры субъектов Российской Федерации Administrative centers of the constituent entities of the Russian Federation	Стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч Cost of electricity, RUB/kWh	Диаметр, м, при $T = 10$ лет Diameter, m, at $T = 10$ years	Диаметр, м, стандарт при $T = 10$ лет Standard diameter, m, at $T = 10$ years	Диаметр, м, при $T = 50$ лет Diameter, m, at $T = 50$ years	Диаметр, м, стандарт при $T = 50$ лет Standard diameter, m, at $T = 50$ years	Диаметр, м, при $T = 100$ лет Diameter, m, at $T = 100$ years	Диаметр, м, стандарт при $T = 100$ лет Standard diameter, m, at $T = 100$ years
1	2	3	4	5	6	7	8
Иркутск Irkutsk	2,0	0,525	0,56	0,591	0,63	0,621	0,63
Новосибирск Novosibirsk	4,2	0,585	0,63	0,657	0,71	0,691	0,71
Москва Moscow	8,0	0,642	0,71	0,721	0,8	0,758	0,8
Якутск Yakutsk	11,0	0,672	0,71	0,755	0,8	0,794	0,8
Анадырь Anadyr	30,0	0,775	0,8	0,870	0,9	0,915	1,0

сти электроэнергии изменяются в диапазоне от 0,63 до 1,0 м, т.е. почти в два раза. Как уже отмечалось, возникают риски от непредсказуемого роста тарифов на электроэнергию. Общественное мнение может воздействовать на исполнительные власти с целью выравнивания тарифов. Если такое произойдет, то в некоторых регионах (например, в Иркутской области) возникнут сложные социальные и экономические проблемы, поскольку промышленность и жилищно-коммунальное хозяйство ориентированы на низкие тарифы электроэнергии, индивидуальный жилищный сектор использует электрическое отопление, транспортировка воды является энергозатратной.

Рассмотрим возможные различные сценарии изменения удельной стоимости электроэнергии, таким образом можно определить риски, которые при этом могут возникать от принятия того или иного решения.

Объект исследования — участок трубопровода длиной 1 км с расходом 0,5 м³/с и по каждому варианту трубопроводов определим стоимость их жизненного цикла (СЖЦ) на основе упрощенной формулы [1]:

$$\text{СЖЦ} = K + T (0,097 \cdot K + C_{\text{элк}}), \tag{2}$$

где T — время ЖЦ, год.

На основании НЦС 81-02-14–2025 для полиэтиленовых труб марки ПЭ 100 SDR представим капиталовложения (K) как функцию диаметров трубопроводов, тыс. руб.:

$$K = (20\,371 \cdot d^2 + 4779,4 \cdot d + 7233) \cdot L, \tag{3}$$

где L — длина трубопровода, км.

Затраты электроэнергии определим по следующей формуле:

$$C_{\text{элк}} = 108 \cdot z_{\text{элк}} \cdot h \cdot x, \tag{4}$$

где $C_{\text{элк}}$ — затраты электроэнергии, тыс. руб/год; $z_{\text{элк}}$ — единичная стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч.

Потери напора h для полиэтиленовых труб рассчитываются по формуле Шевелева [15, 16]:

$$h = 0,001052 \cdot x_i^{1,774} / d_i^{4,774} \cdot l_i, \tag{5}$$

где h — потери напора на участке трубопровода, м. в. ст.; x — расход транспортируемой воды, м³/с; d, l — внутренний диаметр и длина трубопровода, м.

Результаты расчетов по вышеприведенным формулам представлены в табл. 2.

Далее воспользуемся результатами зарубежных исследователей в этой области [17–23] и с учетом полученных значений (см. табл. 2) сформируем матрицу всевозможных исходов (табл. 3). Данная таблица состоит из n строк и n столбцов по количеству возможных значений удельной стоимости электроэнергии. Второй столбец означает, что выбрали один вариант удельной стоимости электроэнергии (например, 2,0 руб. за кВт·ч), а после реализации проекта стоимость электроэнергии оказалась 4,18 руб. за кВт·ч. Следовательно, для этого варианта с учетом диаметра 630 мм вычисляем затраты электроэнер-

Табл. 2. Определение стоимости жизненного цикла трубопровода при различных удельных стоимостях электроэнергии
Table 2. Life-cycle cost of a pipeline at different unit electricity costs

Административные центры субъектов Российской Федерации Administrative centers of the constituent entities of the Russian Federation	Стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч Cost of electricity, RUB/kWh	Диаметр, стандарт, м, при T = 100 лет Standard diameter, m, at T = 100 years	Потери напора, м Head loss, m	Затраты электроэнергии, млн руб. за 100 лет Electricity costs, million RUB over 100 years	Стоимость труб, млн руб. Pipe cost, million RUB	Стоимость жизненного цикла, млн руб. Life-cycle cost, million RUB
1	2	3	4	5	6	7
Иркутск Irkutsk	2,0	0,63	2,84	30,7	28,7	59,4
Новосибирск Novosibirsk	4,18	0,71	1,55	35,0	41,3	76,3
Москва Moscow	8,0	0,8	0,85	36,7	42,4	79,1
Якутск Yakutsk	11,0	0,8	0,85	50,5	42,4	92,9
Анадырь Anadyr	30,0	1,0	0,28	45,4	63,3	118,7

Табл. 3. Матрица рисков и вычисления критериев принятия решения
Table 3. Matrix for risks and decision-making criteria computations

Вариант Option	2,0	4,18	8,0	11,0	30,0	1	2	3	4	5
1	2	3	4	5	6	Критерий Criterion	Критерий Criterion	Критерий Criterion	Критерий Criterion	Критерий Criterion
2,0	59,4	92,8	151,4	197,4	488,7	197,8	488,7	59,4	370,0	274,1
4,18	58,0	76,3	108,3	133,4	292,4	133,7	292,4	58,4	173,7	175,2
8,0	51,6	61,6	79,1	92,9	180,1	93,06	180,1	51,6	61,4	115,9
11,0	51,6	61,6	79,1	92,9	180,1	93,06	180,1	51,6	61,4	115,9
30,0	66,4	69,6	75,4	79,9	118,7	82,0	118,7	66,4	8,0	92,6

гии по формуле (2) с удельной стоимостью 4,18 руб. за кВт·ч и за 100 лет эксплуатации. Такие же вычисления выполняются и для стоимости электроэнергии 8,0, 11,0 и 30,0 руб. за кВт·ч (см. строку 3). В итоге по каждому варианту формируются СЖЦ.

Для выбора предпочтительного варианта воспользуемся следующими критериями принятия решения [24]: 1 — критерий равновероятных рисков Лапласа; 2 — критерий пессимизма Вальда; 3 — критерий максимального оптимизма; 4 — критерий минимизации потерь Сэвиджа; 5 — критерий доверия Гурвица. Выбирается вариант, для которого будет выполняться наибольшее число критериев.

В итоге после определения критериев принятия решения 1–5 (4 критерия из 5 за вариант в 30,0 руб. за кВт·ч), следовательно, этот вариант и можно рекомендовать к реализации проекта. Логическое объяснение выбора этого варианта следует из того, что эксплуатационные затраты, в том числе затраты электроэнергии за ЖЦ, доминируют над единовременными капиталовложениями и надо стремиться к их минимизации.

менными капиталовложениями и надо стремиться к их минимизации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Очевидно обоснование параметров напорных трубопроводов можно осуществить в условиях неопределенности удельных значений водопотребления и вариативности удельных стоимостей электроэнергии. В этом случае матрица всевозможных исходов **М** будет иметь кубическую форму и размерность:

$$\mathbf{M} = \{a_{ij}\}, \text{ размерностью — } (m \times m \times n), \quad (6)$$

где $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; m$ — количество интервалов области неопределенности расходов водопотребления; n — количество интервалов области неопределенности стоимости удельной электроэнергии. Данную матрицу сложно отразить в 3D-формате. Однако для данного примера вариативность электроэнергии можно представить пятью матрицами (по количеству значений стоимости электро-

Табл. 4. Матрица всевозможных исходов стоимости жизненного цикла $T = 50$ лет, млн руб/год, при удельных затратах $z_{\text{элк}} = 2,0$ руб. за кВт·ч

Table 4. Matrix of possible life-cycle cost outcomes for $T = 50$ years, RUB million/year, at a unit electricity cost of $z_{\text{elec}} = 2.0$ RUB/kWh

$D, \text{ м}$ $D, \text{ m}$	Капиталозатраты, тыс. руб. Capital expenditures, thousand RUB	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$ $Q, \text{ m}^3/\text{s}$	0,1	0,122	0,144	0,167	0,189	0,211	0,233	0,256	0,278	0,3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,315	42,99	0,1	47,7	51,5	56,8	64,3	73,6	85,2	99,6	117,8	139,0	162,5
0,355	48,4	0,122	51,0	53,0	55,9	60,0	65,0	71,3	79,1	88,8	100,3	112,9
0,4	55,6	0,144	57,1	58,2	59,7	61,9	64,7	68,1	72,3	77,6	83,8	90,6
0,4	55,6	0,167	57,1	58,2	59,7	61,9	64,7	68,1	72,3	77,6	83,8	90,6
0,4	55,6	0,189	57,1	58,2	59,7	61,9	64,7	68,1	72,3	77,6	83,8	90,6
0,5	75,9	0,211	76,4	76,7	77,2	77,9	78,8	79,9	81,3	83,0	84,9	87,1
0,5	75,9	0,233	76,4	76,7	77,2	77,9	78,8	79,9	81,3	83,0	84,9	87,1
0,5	75,9	0,256	76,4	76,7	77,2	77,9	78,8	79,9	81,3	83,0	84,9	87,1
0,5	75,9	0,278	76,4	76,7	77,2	77,9	78,8	79,9	81,3	83,0	84,9	87,1
0,63	111,0	0,3	111,1	111,2	111,4	111,6	111,9	112,2	112,7	113,2	113,8	114,4

энергии), а каждая матрица будет отражать вариативность возможных нагрузок водопотребления. Следует отметить, что нормы удельного водопотребления, рекомендуемые для проектирования систем водоснабжения в СП 31.13330.2021, рассчитаны на перспективу 1–3 года, но если рассматривать временной интервал более 10 лет, то за счет энергосберегающей политики и технологий удельное водопотребление может уменьшиться до значений 100 л/чел в сутки, а может за счет устройства бассейнов в квартирах, специальных посудомоечных и стиральных машин вернуться на исходные позиции в 250 л/чел в сут. В этом случае для населенного района 100 тыс. чел. диапазон расходов расширится до значений 0,1–0,3 м³/с.

В табл. 4 представлена матрица возможных исходов по СЖЦ (вычисленной на основании стоимости электроэнергии 2,0 руб/кВт·ч) для расходов водоснабжения в интервале значений от 0,1 до 0,3 м³/с. В табл. 4 в третьем столбце и первой строке представлены диапазоны исследуемых возможных перспективных расходов потребления воды районом новой застройки. В первом столбце приведены для каждого значения возможных расходов диаметры трубопровода длиной 1 км, вычисленные согласно формуле (1), а в столбце 2 представлены единовременные капиталовложения в трубопроводы соответствующего диаметра, вычисленные по выражению (3). В столбцах 4–13 приведены стоимости жизненного цикла трубопровода при различных исходах нагрузок перспективного района водоснабжения (приняли 0,1 м³/с, а он оказался 0,122, 0,144, ..., 3 м³/с).

Применяя к матрице 4 критерии принятия решения 1–5, получаем следующие предложения: 1 —

критерий равновероятных рисков Лапласа предлагает диаметр 0,4 м; 2 — критерий пессимизма Вальда, диаметр 0,5 м; 3 — критерий максимального оптимизма, диаметр 0,315 м; 4 — критерий минимизации потерь Сэвиджа, диаметр 0,4 м; 5 — критерий доверия Гурвица, диаметр 0,4 м. Следовательно, при использовании в проекте диаметра трубопровода 0,4 м (предпочтение отдали трем критериям) риск будет минимальным.

Для наглядности представления минимальные риски будем обозначать зеленым цветом, несущественные — синим, средние — желтым, высокие — коричневым, очень высокие — красным. В соответствии с данной цветовой градацией заполним табл. 4 и будем ее читать следующим образом. Выбор трубопровода диаметром 0,4 м обеспечивает минимальный риск. Если по каким-то условиям трубопровод диаметром 0,4 м не подходит или он отсутствует, используем трубопровод диаметром 0,315 и т.д.

Применяя к матрице 5 критерии принятия решения 1–5, получаем следующие предложения: 1 — критерий равновероятных рисков Лапласа предлагает диаметр 0,63 м; 2 — критерий пессимизма Вальда, диаметр 0,63 м; 3 — критерий максимального оптимизма, диаметр 0,5 м; 4 — критерий минимизации потерь Сэвиджа, диаметр 0,63 м; 5 — критерий доверия Гурвица, диаметр 0,63 м. Следовательно, применяя в проекте диаметр трубопровода 0,63 м (предпочтение отдали четырем критериям), мы понесем минимальные риски.

В соответствии с принятыми цветовыми решениями проанализируем табл. 5 следующим образом. Выбор трубопровода диаметром 0,63 м обеспечивает минимальный риск. Если по каким-то условиям трубопровод диаметром 0,63 м не подходит

Табл. 5. Матрица всевозможных исходов стоимости жизненного цикла $T = 50$ лет, млн руб/год, при удельных затратах $z_{элк} = 30$ руб. за кВт·ч

Table 5. Matrix of possible life-cycle cost outcomes for $T = 50$ years, RUB million/year, at a unit electricity cost of $z_{elec} = 30$ RUB/kWh

$D, м$ D, m	Капитало- затраты, тыс. руб. Capital expenditures, thousand RUB	$Q, м^3/с$ $Q, m^3/s$	0,1	0,122	0,144	0,167	0,189	0,211	0,233	0,256	0,278	0,3
0,315	42,99	0,1	114,3	170,3	249,7	362,0	501,6	677,1	892,3	1164,4	1473,3	1834,9
0,355	48,4	0,122	87,5	117,8	160,9	221,6	297,3	391,9	508,2	654,7	821,2	1015,6
0,4	55,6	0,144	77,0	93,6	117,0	150,1	191,0	242,6	305,1	384,5	474,5	579,5
0,4	55,6	0,167	77,0	93,6	117,0	150,1	191,0	242,6	305,1	384,5	474,5	579,5
0,4	55,6	0,189	77,0	93,6	117,0	150,1	191,0	242,6	305,1	384,5	474,5	579,5
0,5	75,9	0,211	83,0	88,4	96,0	106,5	119,7	136,1	156,3	181,7	210,1	243,6
0,5	75,9	0,233	83,0	88,4	96,0	106,5	119,7	136,1	156,3	181,7	210,1	243,6
0,5	75,9	0,256	83,0	88,4	96,0	106,5	119,7	136,1	156,3	181,7	210,1	243,6
0,5	75,9	0,278	83,0	88,4	96,0	106,5	119,7	136,1	156,3	181,7	210,1	243,6
0,63	111	0,3	113,2	114,9	117,3	120,7	124,7	129,8	136,3	144,1	152,8	163,0

или он отсутствует, используем трубопровод диаметром 0,4 и т.д. Логическое объяснение такой градации рисков объясняется тем, что при максимальных значениях стоимости электроэнергии следует принимать наибольшие диаметры трубопроводов из возможных значений.

Обобщая все пять матриц всевозможных исходов по нагрузкам водопотребления для исследуемого интервала значений (0,1, ..., 0,3) м³/с и исследуемого интервала удельной стоимости электроэнергии (2,0, ..., 30,0) руб. за кВт·ч, можно прийти к следу-

ющей матрице выбора решений, представленной в табл. 6.

В табл. 6 каждое решение обозначено различным цветом. Наименьшим риском обладает трубопровод с диаметром 0,5 м, а соответствующий ему диапазон удельной стоимости электроэнергии составляет от 4,18–11,0 руб. за кВт·ч. Этот вариант и рекомендуется к реализации. Следующий вариант (несущественный риск) —рекомендуется диаметр трубопровода 0,63 м и удельная стоимость электроэнергии 8,0–11,0 руб. за кВт·ч.

Табл. 6. Выбор предпочтительного варианта с учетом диаметра трубопровода и стоимости электроэнергии, для которой он и соответствующая насосная станция должны быть рассчитаны

Table 6. Selection of the preferred option by pipeline diameter and electricity cost used to design the pipeline and the corresponding pumping station

$C_{элк}, \text{руб. за кВт}\cdot\text{ч}$ $C_{elec}, \text{RUB/kWh}$		2,00	4,18	8,00	11,00	30,00	$K_{\text{кап}}, \text{тыс. руб.}$ $K_{CE}, \text{thousand RUB}$
$Q, \text{м}^3/\text{с}$ $Q, \text{m}^3/\text{s}$		0,1	0,122	0,167	0,256	0,3	
$D, \text{м}$ D, m	$Q, \text{м}^3/\text{с}$ $Q, \text{m}^3/\text{s}$	Зона допустимых рисков <i>Acceptable risk zone</i>					
0,315	0,1						42 989,6
0,355	0,122						48 415,6
0,4	0,167						55 634,5
0,5	0,256						75 902,3
0,63	0,3						110 964
$K_{\text{кап}}, \text{тыс. руб.}$ $K_{CE}, \text{thousand RUB}$		42 989,6	48 415,6	55 634,5	75 902,3	110 964	—

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный подход можно применить для выбора параметров перспективной системы водоснабжения в условиях неопределенности численности населения, удельных нагрузок водоснабжения, удельной стоимости электроэнергии и др.

Предлагаемый подход реализован в программном комплексе [25], который позволяет оперативно производить вычисления по вышеизложенной методике, исследовать устойчивость принимаемых решений и управлять процессом развития систем водоснабжения при поэтапном их строительстве.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. При рассмотрении перспективных схем водоснабжения возникают неопределенности, связанные с объемами водопотребления, численностью насе-

ления, стоимостью электроэнергии и другими параметрами. Появляются риски от ошибочных решений, и эти риски могут приводить к значительным финансовым затратам и экологическим ущербам.

2. Следует переходить к многовариантному проектированию и рассматривать водопотребление, численность населения, стоимость электроэнергии как нечеткие и неопределенные значения и выбирать из них те, которые обеспечивают минимальные риски по стоимости их ЖЦ.

3. Реализацию схем водоснабжения рекомендуется осуществлять поэтапно в виде очередей строительства с оценкой планируемых и достигнутых значений удельного водопотребления и численности населения. При отклонении от проектных нагрузок предлагается корректировать решение за счет оптимальных реконструкций и для последующей очереди строительства оценивать финансовые риски.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чупин Р.В., Примин О.Г. Обоснование параметров систем водоотведения в условиях неопределенности перспективного потребления воды и сброса стоков // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 11. С. 36–43. EDN ZRKPZR.

2. Feng F., Zhang Yu., Chen Zh., Ni J., Feng Yu., Xie Yu. et al. Machine learning to assess and support safe drinking water supply : a systematic review // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. Issue 1. P. 114481. DOI: 10.1016/j.jece.2024.114481. EDN NJYAPH.

3. El Bilali A., Taleb A. State-of-the art-on irrigation water quality management using data-driven methods: Practical application, limitations, and prospective directions // Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 2024. Vol. 136. P. 103794. DOI: 10.1016/j.pce.2024.103794. EDN HGISYS.

4. Чупин Р.В., Мороз М.В., Чупин В.Р. Проектирование систем водоснабжения и водоотведения в условиях нечетких значений перспективного водопотребления и численности населения // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 11. С. 16–25. DOI: 10.35776/VST.2022.11.02. EDN XXZIEA.

5. Чупин Р.В. Индикативное и адаптивное управление развитием систем водоснабжения и водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 8. С. 24–29. EDN XWQJJR.

6. Ibuot U.P. Communication Strategies for Sustainable Water Supply Systems Development in Select Lagos and Ogun Communities // GVVU Journal of Research and Development. 2025. Vol. 2. Issue 1. Pp. 176–187.

7. Чупин Р.В., Фам Н.М. Оптимизация структуры и параметров развивающихся систем группового водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 1. С. 30–37. EDN VRGOFJ.

8. Bhattarai B.N., Pasitsuparoad P., Gyawali S., Joshi H.P., Ojha R. Can small towns sustain their own water supply systems? A systematic review of what works and what doesn't // International Journal of Advanced Research. 2025.

9. Libey A.K. The Worth of Water: Evaluating Interventions to Achieve Financially and Operationally Sustainable Urban and Rural Water Systems in Low-Income Settings. University of Colorado at Boulder, 2022.

10. Benavides-Muñoz H.M. Index of Sustainability of Water Supply Systems (ISA): An Autonomous Framework for Urban Water Sustainability Assessment in Data-Scarce Settings // Sustainability. 2025. Vol. 17. Issue 24. P. 11293. DOI: 10.3390/su172411293. EDN XMJBGV.

11. Чупин Р.В., Мороз М.В. Применение автомобильного транспорта в системах группового водоснабжения и водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. 2021. № 5. С. 57–64. DOI: 10.35776/VST.2021.05.07. EDN RDVUAL.

12. Чупин Р.В., Мороз М.В., Бобер В.А. Обоснование диаметров трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения на основе минимизации затрат их жизненного цикла // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 4. С. 52–58. DOI: 10.35776/VST.2022.04.07. EDN CIOYJH.

13. Kapanski A.A., Klyuev R.V., Boltrushevich A.E., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Demin A.Y. et al. Geospatial clustering in smart city resource management: An initial step in the optimisation of complex technical supply systems // Smart Cities. 2025. Vol. 8. Issue 1. DOI: 10.3390/smartcities8010014. EDN UGBWSI.

14. Altaf M., Jaffari R., Alalaoul W.S., Musarat M.A., Ammad S. Developing automated strategy of life cycle cost analysis (LCCA) with building information modeling (BIM) integration for building projects // Results in

Engineering. 2025. Vol. 25. P. 104179. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104179. EDN FCQHXY.

15. Sharif S.A., Hammad A. Simulation-based multi-objective optimization of institutional building renovation considering energy consumption, life-cycle cost and life-cycle assessment // Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 21. Pp. 429–445. DOI: 10.1016/j.jobe.2018.11.006

16. Erto P., Lanzotti A. Statistical model “Life Cycle Cost-Reliability” for a new mass transit vehicle // WIT Transactions on The Built Environment. 2026. Vol. 6.

17. Shi H., Wang X., Guo H., Hao H. Risk assessment models to investigate the impact of emergency on a water supply system // Water Supply. 2020. Vol. 20. Issue 8. Pp. 3542–3556. DOI: 10.2166/ws.2020.224. EDN FCLXNS.

18. Odjegba E., Oluwasanya G., Sadiq A., Brion G. Sustainability and risk assessment matrix (SRAM): pathway to water security // Water Supply. 2020. Vol. 20. Issue 7. Pp. 2928–2940. DOI: 10.2166/ws.2020.196. EDN EFUJKD.

19. Nesticò A., De Mare G., Maselli G. An economic model of risk assessment for water projects // Water Supply. 2020. Vol. 20. Issue 6. Pp. 2054–2068. DOI: 10.2166/ws.2020.093. EDN BAYGQZ.

20. Marques J., Cunha M. Upgrading water distribution networks to work under uncertain conditions // Water Supply. 2020. Vol. 20. Issue 3. Pp. 878–888. DOI: 10.2166/ws.2020.011. EDN HYQRJO.

21. Wang Zh., Wu X., Wang H., Wu T. Prediction and analysis of domestic water consumption based on optimized grey and Markov model // Water Supply. 2021. Vol. 21. Issue 7. Pp. 3887–3899. DOI: 10.2166/ws.2021.146. EDN HXXBWZ.

22. Pandey P., Dongre S., Gupta R. Probabilistic and fuzzy approaches for uncertainty consideration in water distribution networks : a review // Water Supply. 2020. Vol. 20. Issue 1. Pp. 13–27. DOI: 10.2166/ws.2019.141

23. Kalbusch A., Ghisi E. Energy consumption in the life cycle of plumbing fixtures // Water Supply. 2019. Vol. 19. Issue 1. Pp. 70–78. DOI: 10.2166/ws.2018.053

24. Орлов А.И. Теория принятия решений : учебное пособие. М. : Экзамен, 2005. 656 с.

25. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2024687562 от 20.11.2024. Минимизация рисков при проектировании трубопроводных систем городского хозяйства / Мелехов Е.С., Ярыгин Р.Н., Бобер В.А.

Поступила в редакцию 13 февраля 2026 г.

Принята в доработанном виде 18 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 3 марта 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Виктор Романович Чупин** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой городского строительства и хозяйства; **Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)**; 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83; РИНЦ ID: 475565, Scopus: 57199418096, ORCID: 0000-0001-5460-4780; chupinvr@ex.istu.edu;

Иванна Александровна Абросимова — аспирант кафедры городского строительства и хозяйства; **Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)**; 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83; старший преподаватель кафедры механизации, автоматизации и роботизации строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1066562, Scopus: 57194454961, ResearcherID: AAC-2335-2022, ORCID: 0000-0003-4207-4449; abrosimovaia@mgsu.ru;

Роман Николаевич Ярыгин — аспирант кафедры городского строительства и хозяйства; **Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)**; 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83; главный инженер; **Научно-производственное предприятие «Гидрикс» (НПП «Гидрикс»); г. Москва, п. Секерино, д. 6, стр. 24; yarygin.r@hydrig.ru.**

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Chupin R.V., Primin O.G. Substantiation of the wastewater disposal system parameters in the context of projected water consumption and wastewater discharge uncertainty. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2017; 11:36–43. EDN ZRKPZR. (rus.).

2. Feng F., Zhang Yu., Chen Zh., Ni J., Feng Yu., Xie Yu. et al. Machine learning to assess and support safe drinking water supply : a systematic review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2025; 13(1):114481. DOI: 10.1016/j.jece.2024.114481. EDN NJYAPH.

3. El Bilali A., Taleb A. State-of-the art-on irrigation water quality management using data-driven methods: Practical application, limitations, and prospective directions. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2024; 136:103794. DOI: 10.1016/j.pce.2024.103794. EDN HGISYS.

4. Chupin R., Moroz M., Chupin V. Designing water supply and wastewater disposal systems in conditions of fuzzy values of prospective water consumption and population base. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2022; 11:16-25. DOI: 10.35776/VST.2022.11.02. EDN XXZIEA. (rus.).
5. Chupin R.V. Indicative and adaptive management of the water supply and wastewater disposal system development. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2018; 8:24-29. EDN XWQJJR. (rus.).
6. Ibut U.P. Communication Strategies for Sustainable Water Supply Systems Development in Select Lagos and Ogun Communities. *GVU Journal of Research and Development*. 2025; 2(1):176-187.
7. Chupin R.V., Fam N.M. Optimization of the structure and parameters of the developing group water supply systems. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2019; 1:30-37. EDN VRGOFJ. (rus.).
8. Bhattarai B.N., Pasitsuparoad P., Gyawali S., Joshi H.P., Ojha R. Can small towns sustain their own water supply systems? A systematic review of what works and what doesn't. *International Journal of Advanced Research*. 2025.
9. Libey A.K. *The Worth of Water: Evaluating Interventions to Achieve Financially and Operationally Sustainable Urban and Rural Water Systems in Low-Income Settings*. University of Colorado at Boulder, 2022.
10. Benavides-Muñoz H.M. Index of Sustainability of Water Supply Systems (ISA): An Autonomous Framework for Urban Water Sustainability Assessment in Data-Scarce Settings. *Sustainability*. 2025; 17(24):11293. DOI: 10.3390/su172411293. EDN XMJBGV.
11. Chupin R., Moroz M. The use of road transport in the systems of group water supply and wastewater disposal. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2021; 5:57-64. DOI: 10.35776/VST.2021.05.07. EDN RDVUAL. (rus.).
12. Chupin R., Moroz M., Bober V. Substantiation of the diameters of pipelines of water supply and wastewater disposal systems based on minimizing the costs of their life cycle. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2022; 4:52-58. DOI: 10.35776/VST.2022.04.07. EDN CIOYJH. (rus.).
13. Kapanski A.A., Klyuev R.V., Boltrushevich A.E., Sorokova S.N., Efremenkova E.A., Demin A.Y. et al. Geospatial clustering in smart city resource management: An initial step in the optimisation of complex technical supply systems. *Smart Cities*. 2025; 8(1). DOI: 10.3390/smartcities8010014. EDN UGBWSI.
14. Altaf M., Jaffari R., Alalaoul W.S., Musarat M.A., Ammad S. Developing automated strategy of life cycle cost analysis (LCCA) with building information modeling (BIM) integration for building projects. *Results in Engineering*. 2025; 25:104179. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104179. EDN FCQHGY.
15. Sharif S.A., Hammad A. Simulation-based multi-objective optimization of institutional building renovation considering energy consumption, life-cycle cost and life-cycle assessment. *Journal of Building Engineering*. 2019; 21:429-445. DOI: 10.1016/j.job.2018.11.006
16. Erto P., Lanzotti A. Statistical model "Life Cycle Cost-Reliability" for a new mass transit vehicle. *WIT Transactions on The Built Environment*. 2026; 6.
17. Shi H., Wang X., Guo H., Hao H. Risk assessment models to investigate the impact of emergency on a water supply system. *Water Supply*. 2020; 20(8):3542-3556. DOI: 10.2166/ws.2020.224. EDN FCLXNS.
18. Odjegba E., Oluwasanya G., Sadiq A., Brion G. Sustainability and risk assessment matrix (SRAM): pathway to water security. *Water Supply*. 2020; 20(7):2928-2940. DOI: 10.2166/ws.2020.196. EDN EFIJKD.
19. Nesticò A., De Mare G., Maselli G. An economic model of risk assessment for water projects. *Water Supply*. 2020; 20(6):2054-2068. DOI: 10.2166/ws.2020.093. EDN BAYGQZ.
20. Marques J., Cunha M. Upgrading water distribution networks to work under uncertain conditions. *Water Supply*. 2020; 20(3):878-888. DOI: 10.2166/ws.2020.011. EDN HYQRJO.
21. Wang Zh., Wu X., Wang H., Wu T. Prediction and analysis of domestic water consumption based on optimized grey and Markov model. *Water Supply*. 2021; 21(7): 3887-3899. DOI: 10.2166/ws.2021.146. EDN HXXBWZ.
22. Pandey P., Dongre S., Gupta R. Probabilistic and fuzzy approaches for uncertainty consideration in water distribution networks : a review. *Water Supply*. 2020; 20(1):13-27. DOI: 10.2166/ws.2019.141
23. Kalbusch A., Ghisi E. Energy consumption in the life cycle of plumbing fixtures. *Water Supply*. 2019; 19(1):70-78. DOI: 10.2166/ws.2018.053
24. Orlov A.I. *Theory of Decision-Making : textbook*. Moscow, Examen, 2005; 656. (rus.).
25. Certificate of state registration of computer programs No. 2024687562 dated November 20, 2024. *Minimizing risks in the design of urban pipeline systems / Melekhov E.S., Yarygin R.N., Bober V.A.*

Received February 13, 2026.

Adopted in revised form on February 18, 2026.

Approved for publication on March 3, 2026.

B I O N O T E S : **Viktor R. Chupin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Urban Construction and Economy; **Irkutsk National Research Technical University (INRTU)**; 83 Lermontov st., Irkutsk, 664074, Russian Federation; ID RSCI: 475565, Scopus: 57199418096, ORCID: 0000-0001-5460-4780; chupinvr@ex.istu.edu;

Ivanna A. Abrosimova — postgraduate student of the Department of Urban Construction and Economy; **Irkutsk National Research Technical University (INRTU)**; 83 Lermontov st., Irkutsk, 664074, Russian Federation; senior lecturer of the Department of Mechanization, Automation, and Robotics in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1066562, Scopus: 57194454961, ResearcherID: AAC-2335-2022, ORCID: 0000-0003-4207-4449; abrosimovaia@mgsu.ru;

Roman N. Yarygin — postgraduate student of the Department of Urban Construction and Economy; **Irkutsk National Research Technical University (INRTU)**; 83 Lermontov st., Irkutsk, 664074, Russian Federation; chief engineer; **Scientific and Production Enterprise “Gidrix”**; build. 24, 6 Sekerino settlement, Moscow, Russian Federation; yarygin.r@hydrig.ru.

Author contributions: all authors contributed equally to the publication.

The authors declare no conflicts of interest.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.05:656.615

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.1001-1008

Оптимизация параметров технологических процессов и систем организации строительства портовых объектов

Вадим Александрович Муря, Алексей Юрьевич Пономарев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Роль портов в поддержке экономического роста, развития глобальных цепочек создания добавленной стоимости и логистических потоков неоспорима. В то время как неэффективные порты тормозят торговлю, нарушают транспортные потоки и повышают затраты, инфраструктура, готовая к будущему, привлекает инвестиции и поддерживает экономическое развитие. Однако строительство портов является дорогостоящим элементом и включает в себя длительные периоды планирования, консультаций и строительства. Эксплуатация и управление портами также требуют специализированной рабочей силы и опыта. Цель исследования заключается в рассмотрении подходов к оптимизации параметров технологических процессов и систем организации строительства портовых объектов.

Материалы и методы. Исследование основано на системном и синтетическом подходах, включающих теоретический анализ литературы, обобщение существующих моделей и подходов к строительству портовых объектов, а также математическое моделирование. Использовались методы стохастической и адаптивной оптимизации, обеспечивающие учет неопределенности технологических, логистических и природных факторов в процессе возведения портовых объектов.

Результаты. Предложена интеллектуально-адаптивная модель многокритериальной оптимизации организационно-технологических систем строительства портовых объектов. Авторская модель обеспечивает робастное, адаптивное и самообучающееся управление строительством портовых объектов, минимизируя отклонения от плана, повышая эффективность использования ресурсов, сокращая сроки и риски, а также интегрируя многокритериальные цели в условиях высокой стохастичности и ограниченных пространственных ресурсов.

Выводы. Предложенная модель позволяет перейти от статического планирования строительных работ к адаптивному управлению, устойчивому к фактическим технологическим отклонениям. Применение на практике этой модели предоставит возможность не просто корректировать график, но и накапливать верифицированные данные для обновления стандартов и развития будущих практик строительства портовых объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: порт, строительство, сроки, план, управление, оптимизация, технологический процесс

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Муря В.А., Пономарев А.Ю. Оптимизация параметров технологических процессов и систем организации строительства портовых объектов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 6. С. 1001–1008. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.1001-1008

Автор, ответственный за переписку: Алексей Юрьевич Пономарев, ntcmost@mail.ru.

Optimization of process parameters and construction management systems for port facilities

Vadim A. Murya, Alexei Yu. Ponomarev

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

ABSTRACT

Introduction. The role of ports in supporting economic growth, global value chains, and logistics flows is undeniable. While inefficient ports slow down trade, disrupt transport flows, and increase costs, future-ready infrastructure attracts investment and supports economic development. However, port construction is costly and involves lengthy periods of planning, consultation and construction. Port operation and management also require a specialized workforce and expertise. The purpose of this paper is to examine approaches to optimizing the parameters of technological processes and systems for organizing the construction of port facilities.

Materials and methods. The study is based on systematic and synthetic approaches, including theoretical analysis of the literature, generalization of existing models and approaches to the construction of port facilities, and mathematical modeling.

In addition, the work used methods of stochastic and adaptive optimization, which take into account the uncertainty of technological, logistical, and natural factors in the process of constructing port facilities.

Results. The paper proposes an intelligent adaptive model for multi-criteria optimization of organizational and technological systems for the construction of port facilities. The author's model provides robust, adaptive, and self-learning management of port facility construction, minimizing deviations from the plan, increasing the efficiency of resource use, reducing time and risks, and integrating multi-criteria objectives in conditions of high stochasticity and limited spatial resources.

Conclusions. The model proposed in this work provides a transition from static planning of construction work to adaptive management that is resistant to actual technological deviations. The practical application of this model will allow not only to adjust the schedule, but also to accumulate verified data for updating standards and developing future practices for the construction of port facilities.

KEYWORDS: port, construction, deadlines, plan, management, optimization, technological process

FOR CITATION: Murya V.A., Ponomarev A.Yu. Optimization of process parameters and construction management systems for port facilities. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(6):1001-1008. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.1001-1008 (rus.).

Corresponding author: Alexei Yu. Ponomarev, ntcmost@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Порты и соответствующая прилегающая инфраструктура являются важнейшими элементами морского сектора. В условиях продолжающегося роста мировой торговли развитие портов играет ключевую роль в обеспечении эффективного перемещения грузов и стимулировании экономического подъема [1]. В последние годы на первый план вышли различные тенденции, направленные на удовлетворение растущих потребностей судоходной отрасли, решение экологических проблем и развитие технологий. Появление этих возможностей ставит перед отраслью серьезные задачи, которые необходимо решать одновременно в условиях конкурирующих приоритетов.

Портовые терминалы, включая контейнерные, грузовые, транспортные, состоят из интегрированных систем сервисных служб и вспомогательных конструкций. Строительство, техническое обслуживание и модернизация этих элементов требуют значительных капиталовложений [2]. Кроме того, с практической точки зрения не подлежит сомнению тот факт, что пространственные проблемы не утрачивают своей актуальности. В данном контексте целесообразно выделить три ключевых аспекта.

1. Оптимизация и рациональное использование территориальных ресурсов. Ограниченность доступных площадей создает сложности при размещении различных объектов и их интеграции с основной портовой функцией. Балансирование между наземной транспортной инфраструктурой, промышленным и жилым строительством требует нетривиальных усилий, поскольку все они соперничают за место в очень ограниченном пространстве [3]. В связи с этим необходимо тщательное планирование и оптимизация технологических процессов с участием широкого круга заинтересованных сторон, чтобы максимизировать экономические и социальные выгоды во всех секторах.

2. Порты и судоходство пересекаются по функциональным интересам с экологическими требованиями, коммунальными и телекоммуникационными системами, а также возобновляемыми источниками

энергии, что предполагает тщательную организацию для минимизации возможных конфликтов.

3. Изменение климата привело к подъему уровня воды и учащению экстремальных погодных явлений, что делает необходимым усиление, повышение и укрепление портовой инфраструктуры [4]. Это, в свою очередь, влияет на финансирование, потребление энергии и расход материалов, что представляет сложность при стремлении достичь показателя «чистого нуля» с ограниченными ресурсами.

Учитывая обозначенные факты, развитие портовой инфраструктуры — это постоянный поиск компромиссов с природными факторами и непрерывный инвестиционный цикл для защиты цепочек поставок в настоящем, а также для обеспечения экологичности глобальной торговли в будущем. Очевидно, что в этих новых обстоятельствах традиционные методы организации строительства портовых объектов системно неэффективны, приводя к колоссальным потерям времени и денег, о чем наглядно свидетельствует статистика возведения, модернизации и улучшения портов в различных странах мира (табл.).

Таким образом, изучение новых технологий строительства портовых сооружений с учетом важных тенденций, определяющих будущее портовой инфраструктуры, включая автоматизацию, устойчивое развитие, взаимосвязанность и инновационные решения для портовых систем, представляет собой актуальное направление для научного поиска, что и предопределило выбор темы данной статьи.

Решением проблем, связанных с обеспечением устойчивости портов и портовых городов, а также разработкой методов по снижению рисков для контейнерных и терминальных сооружений, обусловленных как климатическими угрозами, так и увеличением грузооборота, занимаются Q. Ren [4], Л.А. Андреева, А.Л. Кузнецов, А.М. Сампиев, А.Д. Семенов [5], М.А. Фомин, М.В. Золотарева [6], F. Pian и соавт. [7].

Перспективы использования передовых технологических решений, новых строительных материалов и инноваций с целью оптимизации процесса возведения портовых сооружений описывают L. Wen и соавт. [8], А.А. Зыкова, А.В. Кириченко, В.Э. Гет-

Статистика проблем при реализации крупных инфраструктурных портовых проектов¹

Statistics of problems in the implementation of large infrastructure port projects¹

Показатель / Indicator	Среднемировое значение, % The global average, %	Значение по региону Европа, Ближний Восток и Африка, % Value by region EMEA, %	Примечание / Note
Превышение сметной стоимости Exceeding the estimated cost	+38	25–45	Среднее превышение бюджета проекта над плановым The average excess of the project budget over the planned one
Отставание от графика (срыв сроков) Lagging behind schedule (missed deadlines)	+55	40–70	Среднее увеличение фактического времени реализации проекта Average increase in the actual project implementation time
Недостижение плановых выгод Failure to achieve planned benefits	–35	30–50	Проект генерирует меньше пользы (например, пропускной способности), чем ожидалось The project generates less benefits (e.g. bandwidth) than expected
Рост производительности труда (в год) Labour productivity growth (per year)	~1	0,8	Низкие темпы роста по сравнению с другими отраслями Low growth rates compared to other industries
Доля проблемных проектов The proportion of problematic projects	~30	28	Проекты, требующие реструктуризации или находящиеся под угрозой остановки Projects that require restructuring or are in danger of being shut down

ман [9], А.А. Алексеева, А.А. Крылов, В.А. Панасюк, В.М. Абрамов [10].

Возможности платформ управления активами, которые целесообразно применять в процессе строительства в портах, поскольку они помогают лучше планировать и координировать работу на загруженных объектах, обеспечивая максимальную отдачу от существующих активов и предоставляя полную информацию о состоянии объекта наблюдения, рассматривают Н.А. Гринько, Е.М. Коринец [11], S. Zhou, X. Guo, S. Cao [12], M.N. Maphumulo, M.M. Masuku [13], M.T. Elnabwy и соавт. [14].

В то же время, отдавая должное накопленному на сегодняшний день научному наследию, следует отметить, что с учетом жестких экологических норм, высоких требований к соблюдению сроков и бюджетов строительных проектов ряд вопросов в данной предметной плоскости нуждается в дальнейшем более углубленном изучении. Например, необходимы уточнения решения, которые позволят совместную реализацию портовых проектов с участием заинтересованных сторон в условиях ограниченного пространства. Также особого внимания заслуживают подходы к оптимальному использованию материалов на строительной площадке, позволяющие удовлетворить требования нулевых выбросов.

С учетом вышеизложенного цель статьи заключается в рассмотрении походов к оптимизации параметров технологических процессов и систем организации строительства портовых объектов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование основано на системном и синтетическом подходах, включающих теоретический анализ литературы, обобщение существующих моделей и принципов к строительству портовых объектов, а также математическое моделирование. Использовались методы стохастической и адаптивной оптимизации, обеспечивающие учет неопределенности технологических, логистических и природных факторов в процессе возведения портовых объектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Строительство портовых объектов относится к числу одной из самых сложных и трудоемких форм строительства. В отличие от наземных проектов, которые реализуются на относительно стабильном грунте и в предсказуемых условиях, порты строятся на границе суши и моря — в динамичной среде, подверженной воздействию приливов, волн, течений и штормов [15, 16]. Учитывая динамичность и нестационарность мирового океана, портовые сооружения должны быть

¹ Составлено авторами с использованием отчетов IPA (Infrastructure and Projects Authority), McKinsey & Company.

спроектированы так, чтобы выдерживать постоянные нагрузки, давление и эрозию в агрессивной соленой среде. Еще до начала строительства необходимо провести обширные геотехнические исследования и изучить побережье, чтобы понять состояние морского дна, колебания приливов и отливов, движение отложений и волновой климат [17, 18].

В то же время порт, как отмечалось ранее, — это не только морская инфраструктура, он также должен быть органично интегрирован с наземной логистикой — складами, кранами, инженерными сетями, дорогами и железнодорожными соединениями, чтобы функционировать надежно и стабильно, обеспечивая непрерывность цепочек поставок [19].

Таким образом, принимая во внимание вышеизложенное, управление строительством портовых объектов представляет собой задачу многокритериальной оптимизации в условиях действия факторов различной природы и направленности [20]. Такая постановка вопроса относится к классу NP-трудных стохастических задач планирования. Традиционные детерминированные методы управления являются недостаточными и методологически ограниченными для нивелирования и уменьшения рисков, связанных с возведением портовой инфраструктуры на сегодняшний день. Кроме того, в процессе их использования возникают проблемы с учетом различных типов неопределенности, порожденных возмущениями окружающей среды, а именно:

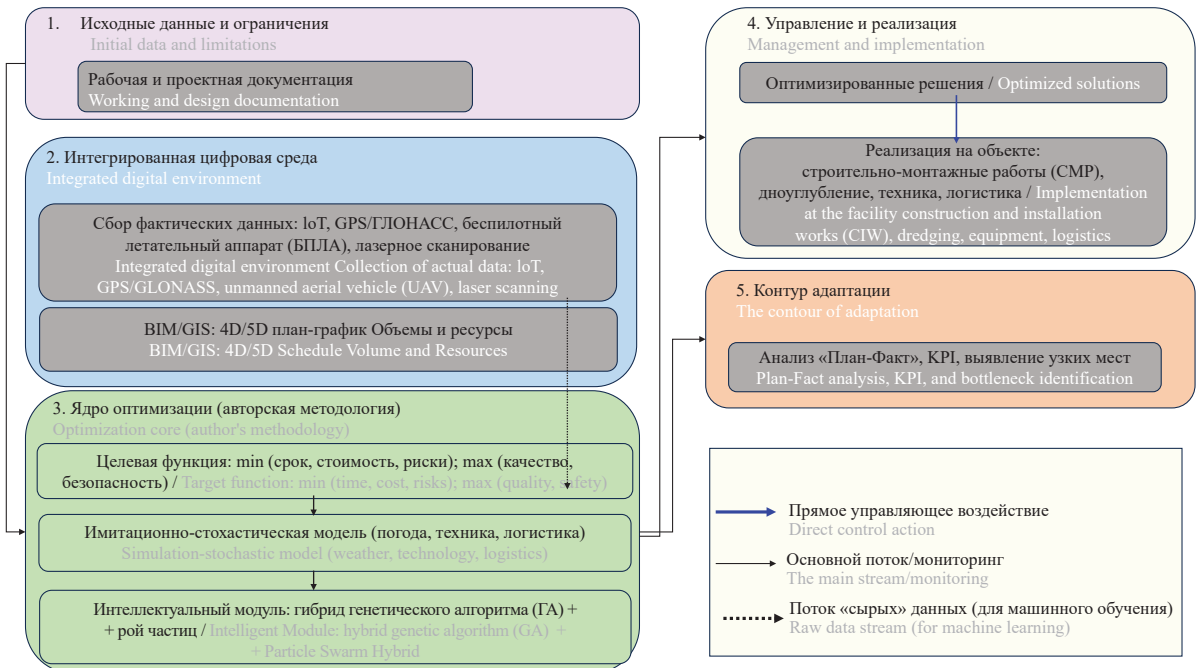
- внешняя стохастичность: погодные и гидрологические условия (волнение, ветер, осадки), влияющие на работу флота и техники;

- внутренняя технологическая вариативность: неполнота собираемых сведений о фактических параметрах строительных процессов. Например, производительность дноуглубления, свайных работ, работ по разработке котлованов напрямую зависят от реальных свойств грунтов (категории, наличия посторонних предметов, валунов), которые зачастую отличаются от данных геологических изысканий;

- организационно-логистическая неопределенность: сбои в цепочках поставок, отказы техники, ошибки персонала.

Существующие на сегодняшний день подходы к оптимизации, которые предполагают фиксацию технологических параметров в виде констант, игнорируют реальные отклонения от плана. Это приводит к неконтролируемому накоплению этих отклонений и, как следствие, к системному срыву сроков. В связи с этим возникает научная проблема разработки робастной (устойчивой) киберфизической системы, способной адаптивно управлять проектом строительства портовой инфраструктуры. Помимо этого, ожидается, что она позволит интегрировать многокритериальные, конфликтующие цели (сроки, затраты, риски, качество, безопасность) и будет адаптироваться к динамически изменяющимся условиям на основе непрерывной интеграции данных.

На рисунке представлена разработанная авторами архитектура киберфизической системы с замкнутым контуром, которая позволит реализовывать многокритериальную оптимизацию организационно-технологических систем строительства портовых объектов.



Интеллектуально-адаптивная модель многокритериальной оптимизации организационно-технологических систем строительства портовых объектов (составлено авторами)

Intellectual and adaptive model of multi-criteria optimization of organizational and technological systems for the construction of port facilities (compiled by the authors)

Предлагаемая на рисунке модель реализует архитектуру киберфизической системы с замкнутым контуром. Она интегрирует физический уровень (объект) с цифровым (модель) и интеллектуальным (ядро принятия решений). Рассмотрим структуру модели более подробно.

Входные данные: формализуют пространство статических ограничений P и исходных параметров (проект, гео- и гидроусловия, нормативы и т.д.).

Интегрированная цифровая среда: функционирует как подсистема сбора и агрегации данных. Информационные и геоинформационные модели представляют плановое состояние объектов строительства. Сенсоры и системы сканирования позволяют получить фактические данные. Цифровой двойник выполняет функцию оценки, синтезируя актуализированный вектор состояния системы $X_{DT}(t)$.

Ядро оптимизации: центральный вычислительный блок, реализующий авторскую методологию робастной оптимизации.

Управление и реализация: подсистема трансляции выработанных ядром управляющих векторов P_{opt} в физические (стратегические и оперативные) решения.

Контур адаптации и самообучения: ключевой кибернетический контур. Он не просто фиксирует отклонения $\in(t)$, а инициирует параметрическую адаптацию ядра оптимизации, обеспечивая его устойчивость и эволюцию системы.

Математическая постановка задачи заключается в следующем.

Пусть P вектор управляющих параметров системы (распределение ресурсов, последовательность операций, логистические маршруты), принадлежащий допустимому множеству P . Задача формулируется как многокритериальная оптимизация. Цель — найти не единственное решение, а множество парето-оптимальных решений P_{opt} :

$$P_{opt} = \arg \max_{P \in P} F(P),$$

где $F(P)$ — векторная целевая функция. Для приведения к задаче максимизации минимизируемые критерии берутся с отрицательным знаком:

$$F(P) = \begin{bmatrix} -f_T(P) \\ -f_C(P) \\ -f_R(P) \\ -f_Q(P) \\ -f_S(P) \end{bmatrix};$$

$$P = \{P | g_i(P) \leq 0, i = 1 \dots m\},$$

где f_T — время; f_C — стоимость; f_R — риски; f_Q — качество; f_S — безопасность; $g_i(P)$ — система линейных и нелинейных ограничений (ресурсных, нормативных).

Фактические параметры реализации строительного проекта по возведению портового объекта $X_{fact}(t)$

рассматриваются как стохастический процесс, отклоняющийся от детерминированного плана $X_{plan}(t)$ на величину вектора возмущений $\in(t)$.

Предположение о нормальном распределении возмущений N с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей Σ является базовым. Научная новизна разработанной авторами модели заключается в том, что матрица Σ не является статической. Контур адаптации непрерывно переоценивает ее компоненты на основе фактических данных, адаптируя модель к реальной волатильности.

Цифровой двойник (DT) выполняет функцию фильтра, рекурсивно оценивая истинное состояние системы $X_{DT}(t)$ путем слияния плановых и фактических данных:

$$X_{DT}(t) = f_{DT}(X_{fact}(t), X_{plan}(t)).$$

Именно актуализированное состояние $X_{DT}(t)$, а не план $X_{plan}(t)$ подается на вход ядра оптимизации для следующей итерации расчета.

Систематизируя вышеизложенное, можно выделить элементы научной новизны разработанной авторами модели.

1. Связь многокритериальной оптимизации с фактическими технологическими данными. В отличие от существующих подходов, фокусирующихся на логистической неопределенности (поставки, отказы), эта модель обеспечивает жесткую связь стохастического оптимизатора с DT. Новизна заключается в том, что DT в реальном времени поставляет в ядро оптимизации фактические технологические параметры (например, реальное сопротивление грунтов, производительность бурового оборудования), а не только логистические. Это позволяет перейти от статичного планирования к адаптивному управлению в реальном времени, которое устойчиво к фактическим отклонениям в технологических процессах.

2. Реализация оптимизации через самообучение. Интеллектуальный модуль (генетический алгоритм + рой частиц) решает NP-трудную задачу поиска в многомерном пространстве P . При этом самообучающийся блок (на основе машинного обучения) реализует мета-оптимизацию: он не только прогнозирует KPI, но и (через тактический контур) адаптивно корректирует гиперпараметры эвристических алгоритмов и весовые коэффициенты в целевой функции $F(P)$, реагируя на изменение приоритетов и параметров строительного проекта.

3. Иерархическая трехуровневая адаптация. Архитектурная новизна модели заключается в реализации трех иерархических контуров обратной связи, которые и обеспечивают самообучение и робастность системы:

- оперативный контур (от физического объекта к DT): обеспечивает непрерывную актуализацию вектора состояния системы;
- тактический контур (от блока «Базы знаний» к «Ядру оптимизации»): выполняет параметриче-

скую адаптацию самой модели. Он не просто корректирует график, а обновляет параметры стохастической технологической модели (например, уточняет геологическую модель или модель производительности на основе $\epsilon(t)$);

- стратегический контур (от «Решений» к «Исходным данным»): реализует долгосрочную обратную связь. Он использует статистику завершенного проекта по строительству портовой инфраструктуры, чтобы исправить и обновить исходные нормативы и стандарты (базу знаний) для будущих проектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Строительство портов сопряжено с логистическими и финансовыми трудностями, а также с рядом технических и экологических препятствий. Задача усложняется на фоне перманентно растущих ожиданий в отношении устойчивого развития и необходи-

мости конструктивного взаимодействия с местным сообществом в плане развития прилегающей инфраструктуры. Это в свою очередь выдвигает на первый план задачи оптимизации и повышения эффективности строительного процесса.

Описана разработанная авторами интеллектуально-адаптивная модель многокритериальной оптимизации организационно-технологических систем строительства портовых объектов, которая позволит обеспечить гибкое управление строительством портовых объектов в реальном времени, интегрируя технологические, логистические и стохастические данные. Ожидается, что это даст возможность минимизировать отклонения от плана, повысить эффективность использования ресурсов, сократить сроки и риски, а также сформировать устойчивую и самообучающуюся систему планирования и контроля для комплексных портовых проектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Николаева А.Б. Развитие портовой инфраструктуры как потенциал для увеличения грузооборота Северного морского пути // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2023. Т. 26. № 3 (81). С. 140–149. DOI: 10.37614/2220-802X.3.2023.81.009. EDN CUHUBA.

2. Воронина Е.П. Основные направления устойчивого функционирования и приоритеты развития Северного морского пути в качестве конкурентоспособной национальной транспортной коммуникации // Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения. 2023. № 4 (16). С. 39–50. DOI: 10.51823/74670_2023_4_39. EDN EGKZGQ.

3. Lin W., Liu W. Resilience Evaluation of Ports along the Maritime Silk Road from the Perspective of Investment and Construction // Journal of Advanced Transportation. 2023. Vol. 2023. Pp. 1–18. DOI: 10.1155/2023/8818667. EDN JFKXRI.

4. Ren Q. Comparison and Cost Analysis of Soft Soil Foundation Treatment Schemes in Port Construction // Advances in Civil Engineering. 2022. Vol. 2022. Issue 1. DOI: 10.1155/2022/6442750. EDN LQPVFR.

5. Андреева Л.А., Кузнецов А.Л., Сампиев А.М., Семенов А.Д. Задачи совершенствования методов технологического проектирования морских торговых портов в новых условиях // Транспортное дело России. 2024. № 1. С. 164–166. EDN CERHHD.

6. Фомин М.А., Золотарева М.В. Преобразование объектов портовой инфраструктуры на примере Нью-Йорка // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 70–81. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-70-81. EDN DYDMPF.

7. Pian F., Shi Q., Yao X., Zhu H., Luan W. Joint Optimization of a Dry Port with Multilevel Location

and Container Transportation: The Case of Northeast China // Complexity. 2021. Vol. 2021. Issue 1. DOI: 10.1155/2021/5584600. EDN EDQLFD.

8. Wen L., Ren Q., Li J. Hainan Port Logistics Supply Chain and Its Flexible Operation Mechanism considering Digital Visual Remote Control // Mobile Information Systems. 2022. Vol. 2022. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2022/4642103. EDN MUJBBC.

9. Зыкова А.А., Кириченко А.В., Гетман В.Э. Влияние развития Северного морского пути на портовую инфраструктуру России // Актуальные проблемы экономики и управления. 2022. № 1 (11). С. 125–130. DOI: 10.52899/978-5-88303-644-5_125. EDN AZFXDH.

10. Алексеева А.А., Крылов А.А., Панасюк В.А., Абрамов В.М. Проблемы и перспективы развития портовой инфраструктуры // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2022. № 3 (43). С. 69–76. EDN FIKDRP.

11. Гринько Н.А., Коринец Е.М. Особенности применения геоинформационных систем в развитии портовой инфраструктуры // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2022. № S2. С. 25–27. EDN YLOIXC.

12. Zhou S., Guo X., Cao S. Enhanced Energy Sharing and Management Between Cross-Harbour Zero-Emission Buildings Based on a Combination of Electric Ferries and Deck-on Electric Vehicles with Grid Integrations // International Journal of Energy Research. 2025. Vol. 2025. Issue 1. DOI: 10.1155/er/9606817. EDN UHPQXJ.

13. Maphumulo M.N., Masuku M.M. The State of Infrastructure in the Proclaimed Small Harbours in Enhancing Livelihoods in South Africa // Journal of International Development. 2025. Vol. 37. Issue 2. Pp. 457–467. DOI: 10.1002/jid.3968. EDN CXQHLW.

14. Elnabwy M.T., Elbeltagi E., El Banna M.M., Alshahri A.H., Hu J.W., Choi B.G. et al. Harbor Sedimentation Management Using Numerical Modeling and Exploratory Data Analysis // *Advances in Civil Engineering*. 2024. Vol. 2024. Issue 1. DOI: 10.1155/2024/1209460. EDN BEFFT.

15. Almeida F., Okon E. Achieving sustainable development goals through digitalization in ports // *Business Strategy and the Environment*. 2024. Vol. 33. Issue 7. Pp. 6737–6747. DOI: 10.1002/bse.3842. EDN VYMPQA.

16. Кочурова А.А. Способы расшивки «узких мест» портовой инфраструктуры Арктического побережья России // *Экономика и предпринимательство*. 2022. № 11 (148). С. 527–529. DOI: 10.34925/EIP.2022.148.11.099. EDN ISKTYU.

17. Коваль В.Н., Процевский В.А., Морозова А.Н. Особенности правового регулирования частных инте-

ресов в процессе функционирования портовой инфраструктуры // *Власть Закона*. 2023. № 3 (55). С. 35–48. EDN ZRZXRT.

18. Яценко А.И., Белый А.А., Никитчин А.А., Бернд О.Х. Применение автоматизированной системы деформационного мониторинга для обеспечения безопасной эксплуатации сооружений портовой и транспортной инфраструктуры // *Путевой навигатор*. 2024. № 59 (85). С. 58–65. EDN ZOSAOM.

19. Gonçalves A., de Aguiar Dutra A.R., de Andrade Guerra J.B.S.O., Dutra A. Ports and Climate Change: A Systematic Review Aligned with the Sustainable Development Goals // *Sustainable Development*. 2025. Vol. 34. Issue S2. Pp. 390–402. DOI: 10.1002/sd.70352. EDN RNXXTV.

20. Yuan Y., Sui Z. Application status and developing trend of emerging technologies in smart port // *China Water Transport*. 2022. Vol. 3. Pp. 60–62.

Поступила в редакцию 7 ноября 2025 г.

Принята в доработанном виде 4 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 1 марта 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Вадим Александрович Мурия — кандидат технических наук, доцент; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 927045, Scopus: 59181231800, ResearcherID: AEX-9031-2022; 89166772070@mail.ru;

Алексей Юрьевич Пономарев — аспирант; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ResearcherID: PMR-2789-2026, ORCID: 0009-0005-3249-4521; ntcmost@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Nikolaeva A.B. Enhancing cargo capacity along the northern sea route through harbor infrastructure development. *Sever i rynok: formirovanie ekonomicheskogo por-yadka*. 2023; 26(3):(81):140-149. DOI: 10.37614/2220-802X.3.2023.81.009. EDN CUHUBA. (rus.).

2. Voronina E.P. The main directions of sustainable functioning and priorities for the development of the northern sea route as a competitive national transport communication. *Arctic 2035: Current Issues, Challenges, Solutions*. 2023; 4(16):39-50. DOI: 10.51823/74670_2023_4_39. EDN EGKZGQ. (rus.).

3. Lin W., Liu W. Resilience Evaluation of Ports along the Maritime Silk Road from the Perspective of Investment and Construction. *Journal of Advanced Transportation*. 2023; 2023:1-18. DOI: 10.1155/2023/8818667. EDN JFKXRI.

4. Ren Q. Comparison and Cost Analysis of Soft Soil Foundation Treatment Schemes in Port Construction. *Advances in Civil Engineering*. 2022; 2022(1). EDN LQPVFR.

5. Andreeva L., Kuznetsov A., Sampiev A., Semenov A. Tasks of improving methods of technological design of trade sea ports in new conditions. *Transport business of Russia*. 2024; 1:164-166. EDN CERHHD. (rus.).

6. Fomin M.A., Zolotareva M.V. Port infrastructure conversion in New York city as an example. *Journal of Construction and Architecture*. 2025; 27(1):70-81. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-70-81. EDN DYDMPF. (rus.).

7. Pian F., Shi Q., Yao X., Zhu H., Luan W. Joint Optimization of a Dry Port with Multilevel Location and Container Transportation: The Case of Northeast China. *Complexity*. 2021; 2021(1). DOI: 10.1155/2021/5584600. EDN EDQLFD.

8. Wen L., Ren Q., Li J. Hainan Port Logistics Supply Chain and Its Flexible Operation Mechanism considering Digital Visual Remote Control. *Mobile Information Systems*. 2022; 2022:1-12. DOI: 10.1155/2022/4642103. EDN MUJBBC.

9. Zytkova A.A., Kirichenko A.V., Hetman V.E. The impact of the development of the northern sea route

on the port infrastructure of Russia. *Actual Problems of Economics and Management*. 2022; 1(11):125-130. DOI: 10.52899/978-5-88303-644-5_125. EDN AZFXDH. (rus.).

10. Alekseeva A.A., Krylov A.A., Panasyuk V.A., Abramov V.M. Problems and prospects of port infrastructure development. *Information technologies and systems: management, economics, transport*. 2022; 3(43):69-76. EDN FIKDRP. (rus.).

11. Grinko N.A., Korinets E.M. Features of the application of geoinformation systems in the development of port infrastructure. *Information technologies and systems: management, economics, transport, law*. 2022; S2:25-27. EDN YLOIXC. (rus.).

12. Zhou S., Guo X., Cao S. Enhanced Energy Sharing and Management Between Cross-Harbour Zero-Emission Buildings Based on a Combination of Electric Ferries and Deck-on Electric Vehicles with Grid Integrations. *International Journal of Energy Research*. 2025; 2025(1). DOI: 10.1155/er/9606817. EDN UHPQXJ.

13. Maphumulo M.N., Masuku M.M. The State of Infrastructure in the Proclaimed Small Harbours in Enhancing Livelihoods in South Africa. *Journal of International Development*. 2025; 37(2):457-467. DOI: 10.1002/jid.3968. EDN CXQHLW.

14. Elnabwy M.T., Elbeltagi E., El Banna M.M., Alshahri A.H., Hu J.W., Choi B.G. et al. Harbor Sedimentation Management Using Numerical Modeling and Exploratory Data Analysis. *Advances in Civil Engineer-*

ing. 2024; 2024(1). DOI: 10.1155/2024/1209460. EDN BEFFTT.

15. Almeida F., Okon E. Achieving sustainable development goals through digitalization in ports. *Business Strategy and the Environment*. 2024; 33(7):6737-6747. DOI: 10.1002/bse.3842. EDN VYMPQA.

16. Kochurova A.A. Ways to relieve the “bottle-necks” of the port infrastructure arctic coast of Russia. *Economics and Entrepreneurship*. 2022; 11(148):527-529. DOI: 10.34925/EIP.2022.148.11.099. EDN ISKTYU. (rus.).

17. Koval V.N., Protsevskiy V.A., Morozova A.N. Peculiarities of legal regulation of private interests in the process of functioning of port infrastructure. *The Rule of Law*. 2023; 3(55):35-48. EDN ZRZXRT. (rus.).

18. Jashhenko A.I., Belyj A.A. Application of an automated deformation monitoring system to ensure the safe operation of port and transport infrastructure facilities. *Road Navigator*. 2024; 59(85):58-65. EDN ZOSAOM. (rus.).

19. Gonçalves A., de Aguiar Dutra A.R., de Andrade Guerra J.B.S.O., Dutra A. Ports and Climate Change: A Systematic Review Aligned with the Sustainable Development Goals. *Sustainable Development*. 2025; 34(S2):390-402. DOI: 10.1002/sd.70352. EDN RNXXTV.

20. Yuan Y., Sui Z. Application status and developing trend of emerging technologies in smart port. *China Water Transport*. 2022; 3:60-62.

Received November 7, 2025.

Adopted in revised form on February 4, 2026.

Approved for publication on March 1, 2026.

B I O N O T E S : **Vadim A. Murya** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 927045, Scopus: 59181231800, ResearcherID: AEX-9031-2022; 89166772070@mail.ru;

Alexei Yu. Ponomarev — аспирант; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ResearcherID: PMR-2789-2026, ORCID: 0009-0005-3249-4521; ntcmost@mail.ru.

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

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 658.531:331.1:69.007-05

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.1009-1024

Обеспечение организационно-технологической надежности строительства на этапе разработки и экспертизы проекта организации строительства (проекта организации работ)

Владимир Вячеславович Сокольников

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается актуальный вопрос влияния решений проекта организации строительства (ПОС), проекта организации работ (ПОР) на организационно-технологическую надежность строительства (ОТН). Исследуется связь нормативных требований к содержанию организационно-технологической схемы (ОТС) в составе ПОС (ПОР) с рациональностью принимаемых организационно-технологических решений и ее влияние на ОТН.

Материалы и методы. Выполнен анализ ключевых положений нормативно-правовой и проектной документации на предмет содержащихся в них неопределенностей, касающихся организации строительства. Уточнены определения понятий «организационно-технологическая надежность», «организационно-технологическая схема», «методы производства работ», «снос», «демонтаж», а также порядок применения терминов в составе нормативно-правовой и проектной документации. Подробно изложен подход к обоснованию ОТС в составе ПОС (ПОР) как к установлению рационального и безопасного метода производства работ, повышающего ОТН строительства. На двух примерах обоснованы рациональные варианты методов производства работ, а также их оформления в составе ОТС.

Результаты. Преодолены неопределенности в применении понятий нормативно-правовой и проектной документации, снижающие ОТН строительства в период проектной подготовки. Предложенный подход и рассмотренные примеры позволили установить структуру ОТС, установить и использовать для разработки ОТС возведения/демонтажа (части) сооружения специфические исходные данные и рациональные формы текстово-графического представления ОТС в составе организационно-технологической документации.

Выводы. Предложенные подходы к обоснованию и оформлению ОТС в составе ПОС (ПОР), а также полученные результаты анализа рассмотренных положений нормативно-методической базы организационно-технологического проектирования, выполненного в комплексе с интерпретацией ключевых положений теории ОТН, являются теоретическим обоснованием повышения ОТН строительного производства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: организационно-технологическая надежность строительства, организационно-технологическая схема, проект организации строительства, структура ПОС, определения терминов, содержание и оформление организационно-технологической схемы, методы ликвидации сооружений, снос, демонтаж

Благодарности. Автор выражает благодарность рецензентам за полезные замечания.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сокольников В.В. Обеспечение организационно-технологической надежности строительства на этапе разработки и экспертизы проекта организации строительства (проекта организации работ) // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 6. С. 1009–1024. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.1009-1024

Автор, ответственный за переписку: Владимир Вячеславович Сокольников, vschief@yandex.ru.

Ensuring the organizational and technological reliability of construction during the development and expert review of a construction organization project (work organization project)

Vladimir V. Sokolnikov

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

ABSTRACT

Introduction. The article addresses the relevant issue of how decisions made for a construction organization project (COP) and a work organization project (WOP) affect the organizational and technological reliability of construction (OTR). It examines the relationship between the statutory regulation of organizational and technological schemes (OTS) within the COP (WOP), the rationality of organizational and technological decisions made, and their effect on OTR.

Materials and methods. The key provisions of regulatory, legal, and design documentation were analyzed to identify uncertainties related to the organization of construction. The authors clarified definitions of the concepts “organizational and technological reliability”, “organizational and technological scheme”, “methods of work execution”, “demolition”, and

“dismantling”. The article describes in detail an approach to substantiating the OTS within the COP (WOP), as the basis of a rational and safe method of work performance that enhances the organizational and technological reliability of construction. Two examples are used to substantiate the rational methods of work execution and their integration into the OTS.

Results. Uncertainties in the use of concepts in regulatory, legal, and design documentation that may adversely affect the organizational and technological reliability of construction during project preparation have been addressed. The proposed approach and the cases considered in the article determine the structure of the OTS, help to identify and use specific source data for developing the OTS for the erection and dismantling of a structure or part of a structure, and to define rational forms of textual and graphical representation of the OTS within organizational and technological documentation.

Conclusions. The proposed approaches to substantiating and presenting the organizational and technological scheme (OTS) within the construction organization project (COP) and the work organization project (WOP), together with the analysis of the regulatory and methodological framework for organizational and technological design, carried out in conjunction with the interpretation of the key provisions of the theory of organizational and technological reliability, serve as a theoretical basis for improving the organizational and technological reliability of construction work performance.

KEYWORDS: organizational and technological reliability of construction, organizational and technological scheme, construction organization project, COP (construction organization project) structure, definitions of terms, content and formatting of organizational and technological schemes, methods for structural removal, demolition, dismantling

Acknowledgments. The author thank the reviewers for their helpful comments.

FOR CITATION: Sokolnikov V.V. Ensuring the organizational and technological reliability of construction during the development and expert review of a construction organization project (work organization project). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(6):1009-1024. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.1009-1024 (rus.).

Corresponding author: Vladimir V. Sokolnikov, vschief@yandex.ru

ВВЕДЕНИЕ

Различным аспектам обеспечения организационно-технологической надежности (ОТН) строительства в настоящее время уделяется значительное внимание большим числом отечественных исследователей. В данном контексте рассматриваются вопросы планирования [1]; методы выполнения технологических процессов [2]; методы ресурсного обеспечения [3]; методы критериальных оценок ОТН строительства в целом [4]; выявления факторов, влияющих на ОТН [5]; оценки эффективности комплексных организационно-технологических решений (ОТР) [6], в том числе при сносе (демонтаже) сооружений [7]; моделирования ОТН [8, 9]. В исследовании [7] также теоретически обосновано, что проект организации строительства (ПОС) входит в состав инженерной части детерминированной модели ОТН. Организационно-технологическая надежность определена как «способность принимаемых организационных, технологических, управленческих и экономических решений обеспечивать достижение необходимого результата в условиях случайных возмущений, свойственных сложной вероятностной системе строительства» [10].

Учитывая, что организация — это один из методов управления выполнением строительных технологических процессов, опирающийся на экономические (хозяйственные) параметры функционирования приобъектного строительного производства, ОТН строительства можно интерпретировать как «запас регулирования соотношений ключевых параметров: выполнения технологических процессов (модифицируемость методов производства работ в условиях меняющейся строительной готовности); сооружения (вариантность пространственной и технологической последовательности работ), а также функционирования приобъектного строительного хозяйства (ва-

риантность методов обеспечения непрерывности и темпа выполнения техпроцессов), обеспечивающий качество, плановые сроки и стоимость строительства в условиях допустимых отклонений организации выполнения техпроцессов при случайных возмущениях».

Согласно ст. 3 № 384-ФЗ¹ объектом технического регулирования являются «...связанные со зданиями и с сооружениями процессы проектирования..., строительства, монтажа... и утилизации (сноса)». При аналитическом решении *краевой* задачи для математической функции детерминированной модели ОТН строительного производства [7] ОТН, интерпретируемую как *запас регулирования*, можно определить как «интервал допустимых величин соотношений параметров краткосрочного прогнозирования и параметров координирования приобъектного строительного производства в ходе предотвращения и преодоления нарушений темпа и ритма выполнения техпроцессов при текущих ограничениях, накладываемых как начально конечными условиями сроков календарного графика, так и граничными условиями готовности к расходованию ресурсов».

Таким образом, в контексте обеспечения ОТН строительства методические средства регулирования указанных выше соотношений по параметрам сроков и темпа выполнения техпроцессов при ограничениях текущей строительной готовности сооружения и календарного графика (КГ) представляют собой:

- корпоративные алгоритмы и процедуры прогнозирования непрерывности производства (с горизонтом прогнозирования до трех-пяти дней);
- алгоритмы и правила координирования служб и участков предприятия подрядчика, основанные на данных проектной организационно-технологиче-

¹ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон № 384-ФЗ.

ской документации, прежде всего ПОС, на доступном ресурсном обеспечении, а также на допустимых изменениях значений параметров функционирования приобъектного хозяйства.

Согласно Постановлению Правительства РФ от 16.02.2008 № 87² ПОС должен содержать пункты:

1) з) «обоснование принятой организационно-технологической схемы (ОТС), определяющей последовательность возведения зданий и сооружений, ... обеспечивающей соблюдение установленных в календарном плане... сроков завершения строительства, реконструкции (их этапов), капитального ремонта». То есть п. «з» устанавливает обоснование ОТС как результат анализа графика продолжительности строительства и его этапов, но не как доказательство рациональности методов производства работ и их организации. По контексту пункта «з» понятие ОТС применено ко всему сооружению, но п. «з» не предусматривает представления ОТС сооружения в явном виде. Вместе с тем п. 5.4. МДС 12-81.2007³ указывает на необходимость наличия в составе ПОС «ОТС... возведения здания (сооружения) с описанием последовательности и содержания основных технологических процессов», но не содержит рекомендаций по ее разработке и оформлению. Следует отметить, что без формулирования задач, решаемых участниками строительного процесса с помощью требуемых описаний, сложно установить направленность и необходимый уровень детализации требующихся описаний;

2) к) «...технологическую последовательность работ при возведении объектов... или их отдельных элементов». Ключевое понятие п. «к» — «технологическая последовательность работ» применительно к объекту в составе комплекса сооружений, объекту в составе единственного сооружения и, следовательно, к «элементам» объекта трактуется различно, как:

- «технологическая последовательность выполнения комплекса строительных монтажно-укладочных техпроцессов на различных сооружениях объекта»;

- «технологическая последовательность выполнения комплекса строительных монтажно-укладочных техпроцессов на отдельной захватке/фронте, включая обеспечивающие инженерные мероприятия, обусловленная определенными соотношениями проектных решений сооружения»;

- «упорядоченное проектными решениями сооружения или его части (“отдельных элементов”) технологическая последовательность выполнения отдельных строительных монтажно-укладочных процессов»;

² О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию : Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 № 87.

³ МДС 12-81.2007. Методические рекомендации по разработке и оформлению проекта организации строительства и проекта производства работ. М. : ЦНИИОМТП, 2007.

- «упорядоченная проектными решениями “отдельных элементов” сооружения технологическая последовательность ключевых рабочих операций при выполнении техпроцесса» (что должно являться предметом разработки проекта производства работ (ППР)).

И во всех случаях может включать подготовительные техпроцессы и обеспечивающие инженерные мероприятия. В случаях второй, третьей и четвертой трактовки речь, скорее всего, идет об архитектурных частях единственного здания/сооружения, но сооружение — это совокупность архитектурных частей, состоящих из конструкций, элементами которых являются строительные изделия и детали, а «элементы объектов» — это отдельные сооружения или инженерные сети. То есть п. «к» содержит неопределенность в понимании того, к чему относится технологическая последовательность «работ»: к объекту в составе нескольких зданий/сооружений, к объекту в составе одного здания/сооружения, или к отдельным элементам объекта: комплекса сооружений, или отдельного сооружения. Пункт «к» не содержит требования описания пространственной последовательности выполнения «работ». Таким образом, использованное в п. «к» понятие «технологическая последовательность работ» предполагает, скорее всего, разработку некоторого нумерованного списка строительных техпроцессов с привязкой к конкретным проектным отметкам и решениям, структурированного по архитектурным частям сооружения в порядке их возведения, а не описание строительных технологий путем формирования извлечений из СП** и известных учебных и справочных изданий. Такая форма представления технологической последовательности явилась бы содержанием табличной части диаграммы Ганта и в купе с ограничениями ОТС составила бы надежную основу для совмещения во времени техпроцессов и их комплексов при разработке КГ возведения сооружения в составе ПОС;

3) ф1) «...в случае необходимости сноса... зданий, строений и сооружений: ... описание и обоснование принятого метода сноса; ... описание и обоснование решений по безопасным методам ведения работ по сносу»; п. «ш» «технологические карты-схемы последовательности сноса строительных конструкций». Пункты «ф1» и «ш» не содержат требований относительно проектирования демонтажных работ.

Следует также отметить, что МДС 12-64.2013⁴ не предусматривает разработку ОТС; МДС 12-29.2006⁵ отменен.

Необходимо заметить, что классификация методов производства работ основывается на субъективном комбинировании проектировщиками и экс-

⁴ МДС 12-64.2013. Типовой проект организации работ на демонтаж (снос) здания (сооружения). ЗАО «ЦНИИОМТП».

⁵ МДС 12-29.2006. Методические рекомендации по разработке и оформлению технологической карты (отменен).

пертами различных параметров выполнения работ. Например, направление работ в отметках сооружения (продольный, поперечный, учет подземного или надземного расположения конструкций, конструктивный тип и назначение сооружения) и другие методы [11], вид реализуемых строительных технологий [12], вид монтируемых конструкций [13, 14], а также выполняемых строительных техпроцессов [15]. При этом понятие «строительные работы» включает как выполнение техпроцессов, так и связанных с ними обеспечивающих инженерных мероприятий (ОИМ).

Видимо, в связи с изложенными выше обстоятельствами (которые дополнены в примере 1 для случаев ликвидации сооружений, см. далее), эксперты выставляют большее число замечаний по пунктам «з», «к», «ф1» и «ш» раздела ПОС проектной документации (ПД) не с конкретно сформулированными указаниями допущенных принципиальных ошибок, или существенных упущений, а, например, требуют повысить уровень детализации описания технологии разработки грунта, или технологии монтажа конкретной конструкции с описанием стенда укрупнительной сборки и т.п. То есть на стадии проектирования «П», при неизвестных еще в этот период данных ПД стадии рабочего проекта «Р», а также технических возможностей подрядчиков, проектировщики часто вынуждены принимать в ПОС необоснованные решения, которые принимают в ППР на основании ПД стадии «Р». В случае сноса сооружений (п. «ф1» Постановления Правительства РФ № 87²) особое внимание уделяется экспертами повышенному уровню детализации описания решений, независимо от того, ликвидируется ли комплекс небольших зданий, или, например, несколько опор наружного освещения и кабельная линия длиной 100 м (уровень рассмотрения в техкарте). Также различные региональные экспертизы могут потребовать разместить один и тот же материал или в п. «з», или «к», или «ф1», а также частично включать, или полностью исключать из ПОС приложения с транспортными схемами поставки материалов, или документами из состава исходно-разрешительной документации (ИРД).

Возвращаясь к п. «з» Постановления Правительства РФ № 87², неразрывно связанному с п.п. «к», «ф1» и «ш», можно констатировать тот факт, что ситуация, сложившаяся в настоящее время с применением понятия ОТС и пониманием его инженерного смысла, в том числе при ликвидации (части) сооружения, характеризующаяся неопределенностью подходов к обоснованию, содержанию и оформлению ОТС, имеет следствием, с одной стороны — потерю необходимой как подрядчикам, так и экспертам информации, а с другой — снижение ОТН строительства, что может повлечь в сложных случаях возведения или ликвидации сооружений значительные инвестиционные, бюджетные, ресурсные и репутационные потери участников строительного процесса (см. далее).

Учитывая вышеизложенное, целью настоящей статьи является развитие и совершенствование нормативно-методической базы организационно-технологического проектирования строительного производства. Главными задачами, решаемыми в настоящей статье, стали обоснование подходов к разработке и оформлению организационно-технологических схем в составе проектной организационно-технологической документации (ОТД), а также преодоление выявленных неопределенностей в отдельных положениях нормативно-методической базы организационно-технологического проектирования, снижающих ОТН строительного производства.

Рассмотрен подход к разработке ОТС в составе ОТД и как к доказательству рациональности и безопасности решений по методам производства работ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Смысл понятия ОТС, его применение и оформление в ПД

Так как в общем случае продолжительность строительства может быть директивной или определяемой по нормативам и не имеет в явном виде связи с проектными решениями объекта капитального строительства (ОКС), а только с его назначением и строительным объемом, то по логике организационно-технологического проектирования методической основой установления пространственной и технологической последовательности выполнения техпроцессов и ОИМ являются соотношения ключевых параметров выполнения последних и параметров архитектурных и конструктивных решений сооружения в условиях текущей строительной готовности. Соотношения, которые формируют ограничения, учитываемые как при разработке КГ, когда решается вопрос о хронологической последовательности работ, т.е. о совмещении их во времени при установленном разделении в пространстве, так и при анализе и установлении/выборе рациональных и безопасных методов работ. В общем случае можно сказать, что соотношения ключевых параметров выполнения техпроцессов и ОИМ и параметров архитектурных и конструктивных решений сооружения, влияющие на пространственную и технологическую последовательности, и методы работ в условиях текущей строительной готовности и определяют смысл понятия ОТС.

Подход к разработке ОТС не только с точки зрения принятия решений, определяющих продолжительность строительства и его этапов, но и как к доказательству рациональности и безопасности пространственно-технологической последовательности выполнения техпроцессов и ОИМ и принимаемых на их основе ОТР по методам производства работ, представляется весьма перспективным для повышения ОТН строительства. В этой связи целесообразно разрабатывать и оформлять в составе ПОС ОТС расширенного содержания, особенно для случаев

совмещения во времени и пространстве выполнения нескольких техпроцессов, например:

- возведения/ликвидации обширных зданий театров, музеев, вокзалов и аэропортов, стадионов и спорткомплексов, иных общественных и промышленных зданий, зданий с неполным каркасом и/или со сложными архитектурными и редко применяемыми конструктивными решениями несущих и ограждающих конструкций и покрытий или отдельных их частей;
- капитального ремонта зданий перекрестно-стенной схемы с заменой перекрытий, стропил, надстраиванием при сохранении исторических стен;
- возведения с помощью башенных кранов зданий, подземная часть которых существенно выходит в плане за крайние оси надземной части;
- возведения с помощью стреловых самоходных кранов большепролетных каркасов при ограничениях перемещений механизмов, накладываемых проектными решениями подземной части;
- устройства монтажных разрывов на всю высоту возводимого здания;
- устройства стропильных систем сложной геометрии (купол, «волна», башни и т.п.);
- комплекса работ по монтажу навесных фасадов, устройству и подшивке навесов (карнизов), монтажу кровельного покрытия из карт;
- отсыпки-разработки грунта многоуровневого котлована в ходе устройства подземной части из монолитного ж-б, верхняя отметка которой в крайних осях и выше, и ниже на 3 и более метра дневной поверхности участка с сильным уклоном рельефа;
- устройства буронабивных свай-колонн с закреплением грунта цементацией под сваями-стойками.

А также в иных случаях, требующих индивидуальной (сложной) пространственной и/или технологической последовательности (организации) выполнения ключевых рабочих операций нескольких совмещаемых на захватке техпроцессов и ОИМ.

Если ОТС в составе ПОС рассматривать в контексте обоснования наиболее сложных принципиальных ОТР возведения какой-либо части сооружения или совмещения технологических процессов, имея при этом в виду, что для более простых случаев проектных решений сооружения при необходимости подрядчиком будут разработаны техкарты в составе ППР (с учетом ОТС из состава ПОС), то в п. «з» ПОС следует приводить объектовую ОТС (оОТС), а в п. «к» рассматривать общую ОТС № 1 (оОТС) на подземную часть, общую ОТС № 2 на несущие конструкции надземной части и общую ОТС № 3 на устройство покрытия в случае его нетипового (сложного) архитектурного и конструктивного решения. Частные ОТС (чОТС) к перечисленным общим ОТС целесообразно разрабатывать в ППР. Объектовая ОТС (оОТС) разрабатывается на основе схемы механизации работ, имеющейся в строительном генеральном плане (СГП), содержит разбивку подземной

и надземной частей сооружения на фронты в плане и/или на ярусы на разрезе сооружения и устанавливает пространственную последовательность возведения несущих конструкций сооружения. В общих ОТС № 1–3 в ПОС на фрагментах планов и разрезов с наиболее сложными проектными решениями сооружения целесообразно приводить пространственно-технологическую последовательность совмещаемых во времени техпроцессов. Также в общих ОТС целесообразно указывать ключевые характеристики механизмов или их ориентировочные марки, оставляя окончательный выбор марки механизма за подрядчиком.

Исходными данными для разработки структуры ОТС являются результаты анализа разделов ПД: СПОЗУ, АР, КР, ИОС, ИГДИ, ИГИ, отчетов по результатам обследования сооружений, а также иной ИРД и ПД. Указанный анализ имеет две направленности: первая — обоснование номенклатуры и количественных параметров выполнения техпроцессов, а также размещения (привязок на стройплощадке) элементов приобъектного строительного хозяйства; вторая — выявление наиболее сложных частей проектируемого/подлежащего ликвидации сооружения и обоснование рациональных методов производства работ в соответствующих проектных отметках. В первом случае результаты анализа разделов ПД согласно Постановлению Правительства РФ № 87² оформляются стройгенпланом, календарным графиком и текстовой частью ПОС, кроме пп. «з», «к», «ф1» и «ш». Во втором случае результаты анализа могут быть оформлены в составе пп. «з», «к», «ф1» и «ш» как принципиальные решения по порядку и методам выполнения техпроцессов и ОИМ в отметках сооружения, наиболее сложных с точки зрения производства работ и которые подлежат детализации в составе ППР и техкарт. При этом п. «з» «обоснование ОТС» будет содержать только принципиальные решения, основанные на устанавливаемых разработчиком описанных выше соотношениях и координирующие разработку решений по пп. «к», «ф1» и «ш».

Таким образом, понятие ОТС может применяться как ко всему сооружению, так и к наиболее сложной (с точки зрения организации работ) его части, что обосновывает индивидуальную структуру ОТС для конкретного объекта. В общем случае структура ОТС содержит объектную ОТС (оОТС) пространственно-технологической последовательности возведения сооружения, а также необходимое число общих (оОТС) и частных (чОТС) организационно-технологических схем производства работ по возведению отдельных частей сооружений, связанных схемой механизации работ из состава стройгенплана и ведомостью потребных машин и механизмов из п. «л» Постановления Правительства РФ № 87².

Учитывая, что ОТС в составе ПОС содержит принципиальные решения, с одной стороны обосновывающие рациональность принятых методов работ,

а с другой — координирующие содержание иных пунктов раздела «Проект организации строительства», разделов ППР и техкарт, оформление ОТС должно быть приближено к типовым формам указанных документов. То есть ОТС — это лист ПД с текстово-графическим представлением пространственно-технологической последовательности: либо возведения сооружения (оОТС), либо указаний по производству работ в локализованных разработчиком отметках сооружения (чОТС). ОТС из состава ПОС детализируется в нужном подрядчику объеме в ППР и техкартах.

Частные ОТС могут разрабатываться при значительных геодезических, геологических ограничениях методов производства работ, а также в случаях значительных ограничений способов механизации работ текущей строительной готовностью сооружения, или характеристиками стройплощадки. Структуру ОТС, число и названия чОТС, выполняемых обязательно с применением проектных обозначений возводимых/ликвидируемых конструкций, определяет разработчик. В качестве примера оформления ОТС в составе ПОС простого сооружения можно указать краткое описание подготовительного и основного периода работ, перечисление этапов строительства, названия которых содержат комбинации отдельных архитектурных частей сооружения, а также привязку и выбор числа и марок монтажных кранов, что для сложных случаев (см. выше) представляется недостаточным для обеспечения ОТН.

В обосновании правильности изложенного подхода следует рассмотреть конкретные примеры крайних случаев производства работ, требующих разработки ОТС.

Пример 1. Обоснование общей ОТС монтажа сборного ж/б каркаса промышленного здания.

На рис. 1 представлен интерфейс ОТС монтажа сборного ж/б каркаса промышленного здания двумя параллельными равно ритмичными потоками на двух фронтах с помощью четырех стреловых кранов К № 1–К № 4, работающих как совместно, так и раздельно. Промышленное здание представляет собой 6 температурных блоков высотой 10 и 12 м. В качестве обоснования приведенной в примере 1 оОТС возведения каркаса промышленного здания могут выступать, например, требование снижения продолжительности работ, или требование эффективного использования парка монтажных кранов, или логистические требования почасового графика подачи на монтаж «с колес» элементов и прочее. Приведенная на рис. 1 ОТС может оформляться как в составе ПОС (что позволит подрядчику внести свои уточнения при разработке ППР), так и в составе ППР.

Пример 2. Обоснование ОТС для случая ликвидации сооружения.

Обоснование ОТС ликвидации сооружения ведется с позиций трактовок имеющихся определений терминов «снос» и «демонтаж», работы конструкций в сооружении конкретного конструктивного типа, ре-

зультатов анализа данных обследования сооружения, установления расчетных ситуаций (п. 18 ст. 2 № 384-ФЗ¹). Согласно перечисленным аспектам обоснования ОТС ликвидации сооружения следует отметить следующие факторы.

В п. 14.4 ст. 1 № 190-ФЗ⁶ снос ОКС определен как «ликвидация объекта капитального строительства путем его разрушения..., разборки и (или) демонтажа ..., в том числе его частей». В п. 3.5 СП 325.1325800.2017⁷ демонтаж (разборка) объекта определен как «ликвидация здания (сооружения) путем разборки сборных и обрушения монолитных конструкций...». В п. 3.10 МДС 12-81.2007³ снос объекта определен как «ликвидация здания (сооружения) одним из способов обрушения (механический, термический, взрывной или их комбинации)...».

В терминах строительной механики и технологии производства работ по ликвидации (части) сооружения снос — это техпроцесс приложения в наиболее уязвимые места сооружения заведомо разрушающих воздействий (сил), не предусматривающий сохранения в ходе работ сносимых элементов и результатом которого является ликвидация (части) сооружения.

Согласно общей формуле динамики для движения любой системы тел [16]:

$$Sm \left(\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \delta x + \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \delta y + \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} \delta z \right) + Sm(Pdp + Qdq + Rdr) = 0, \quad (1)$$

где первое слагаемое соответствует воздействию, передающему системе тел массы Sm ускорение (в том числе упругие деформации); а второе — скомпенсированные по направлениям dp, dq, dr внешние силы P, Q, R , удерживающие систему тел (конструкций) массой Sm в состоянии покоя (в обозначениях Лагранжа: δ -вариация (малое приращение) пространственных координат x, y, z ; Sm — суммирование масс тел).

Для случая сноса сооружения выражение (1) следует переписать в следующем виде:

$$Sm \left(\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \delta x + \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \delta y + \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} \delta z \right) \geq Sm(Pdp + Qdq + Rdr). \quad (2)$$

Если в выражении (1) первое слагаемое описывает упругие деформации системы тел общей массой Sm , то в формуле (2) оно описывает движение системы тел массой Sm в результате возникающих моментов при приложении сил к конструкциям, вызванных различными воздействиями и причинами.

Технология демонтажа аналогична технологии монтажа с той лишь разницей, что вместо закрепления выполняют отсоединение укрупненного блока (эле-

⁶ Градостроительный кодекс Российской Федерации от 24.12.2004 № 190-ФЗ.

⁷ СП 325.1325800.2017. Здания и сооружения. Правила производства работ при демонтаже и утилизации.

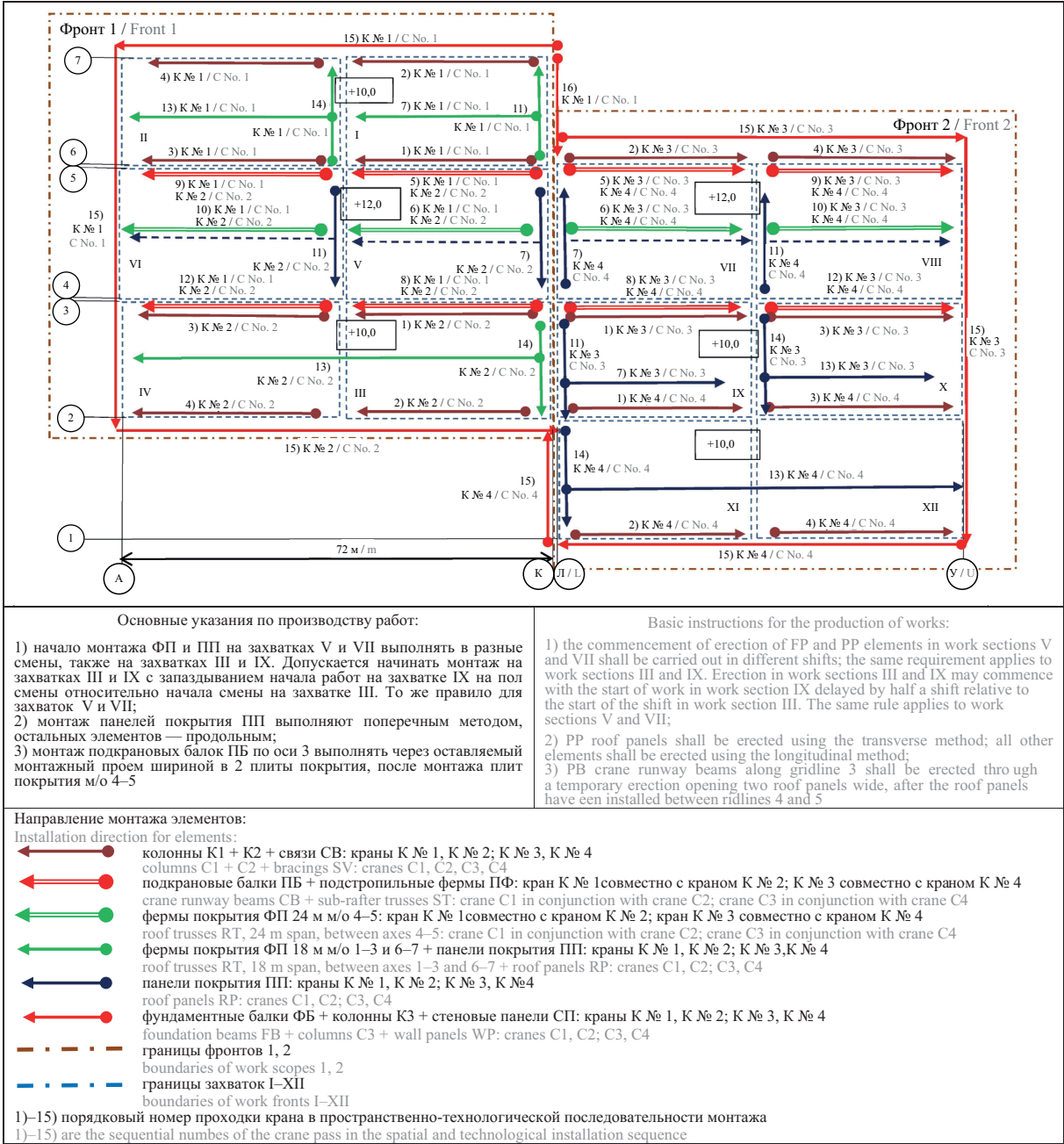


Рис. 1. оОТС монтажа каркаса промышленного здания двумя одноритмичными технологическими потоками, обслуживаемыми четырьмя стреловыми кранами одинаковой грузоподъемности

Fig. 1. General organizational and technological scheme for the erection of an industrial building frame by two single-rhythm technological flows serviced by four jib cranes of the same lifting capacity

мента) и его удаление из проектных отметок с последующей разборкой или разрушением. Демонтаж — это техпроцесс приложения по возможности не разрушающих усилий к узлам соединений элементов конструкций, предусматривающий сохранение отделяемых от сооружения элементов, результатом которого также является ликвидация (части) сооружения. В отличие от сноса, при демонтаже необходимая статика временно/частично сохраняемой (части) сооружения описывается общим уравнением:

$$Pdp + Qdq + Rdr = 0, \quad (3)$$

что может потребовать выполнения временных подкреплений для обеспечения ее устойчивости, так как разбираемая конструкция в период демонтажа работает не по расчетной схеме по причине перераспределения усилий в узлах и элементах при несимметричном относительно центра масс разъединении узлов и снятии нагрузок.

То есть «снос» и «демонтаж» с позиций механики и технологии — это принципиально различные методы ликвидации сооружения, а не обратное (нормативное) утверждение. Демонтаж на основании формулы (1)

предполагает большую трудоемкость работ, более сложную их организацию и является менее предпочтительным с экономической точки зрения.

В п. 18 ст. 2 № 384-ФЗ¹ дано определение термину «расчетная ситуация — учитываемый в расчете комплекс возможных условий, определяющих расчетные требования к строительным конструкциям, ... и частям указанных конструкций». В контексте проектирования технологии и организации работ инженерная трактовка определения «расчетная ситуация» позволяет применить его не только к расчетам архитектурно-строительного проектирования, но и в ходе обоснования ОТС и методов производства работ. Вместе с тем п. 5.1.16 ГОСТ 31937–2011⁸ «...Заключение по итогам обследования технического состояния объекта...» не содержит требований о разработке рекомендаций по методам решения задач, поставленных в техническом задании заказчика на обследование, а п. 5.1.2 не устанавливает требований к выбору метода ликвидации (части) сооружения. В свою очередь, в п. 3.4 МДС 12-64.2013⁴ «Обоснование принятого метода демонтажа (сноса) ...» указано, что «выбор и обоснование метода демонтажа (сноса) зависят от того, что указано в задании заказчика: если ликвидация объекта задана способом «демонтаж», то — разборка объекта, если «снос», то — разрушение объекта». То есть при существующей с точки зрения технологии и организации работ неопределенности применения понятий «ликвидация», «снос», «демонтаж» и «методы работ» выполнять «снос» или «демонтаж» должны определять либо заказчик (что случается редко), либо направленность последующего проектирования, или иная распорядительная документация. Поскольку ликвидация сооружения — это в общем случае, и как правило, комбинирование в различных отметках сооружения методов «снос», «демонтаж», «разборка в проектных отметках» и их модифицирование, то разработчики разделов ПД должны обосновывать рациональность и безопасность предлагаемых *способов* ликвидации (сочетаний «демонтажа» и «сноса», что не предусмотрено нормативами).

Возвращаясь к задаче обоснования ОТС, нужно отметить, что обоснование может опираться на различные теоретические модели [17–19] и принципы [20], такие как «исключение, или минимизация перераспределения усилий в конструкциях в ходе работ», «минимизация количества выполняемой механической работы», «баланс минимизации соотношений нормативных и предлагаемых параметров выполнения работ, таких как продолжительность работ, трудоемкость ручного труда, масса технологической оснастки и прочие, вытекающие из соотношений параметров объекта и выполняемых техпроцессов». В качестве примера основного источника обоснования ОТС ликвидации сооружения можно привести

восстановленную принципиальную схему (рис. 2) перераспределения усилий в конструкциях в ходе их ликвидации, так как имеющихся у разработчика проекта организации работ (ПОР) исходных данных, содержащихся в отчетах и заключениях по результатам обследования сооружения, материалов МДС 12-64.2013⁴, а также сведений в [21–24] для выполнения обоснований недостаточно. Указанная схема может разрабатываться как при оформлении рекомендаций по результатам обследования, выполненных с целью обеспечения последующего проектирования сноса, или демонтажа, или реконструкции, так и при разработке разделов конструктивных решений (КР) и ПОС в составе ПД на реконструкцию. Разработка схемы в составе отчета по обследованию или раздела КР ПД на реконструкцию предпочтительнее, так как предполагает выполнение профильными специалистами поверочных расчетов в качестве одного из основных обоснований методов работ.

Схема изменения усилий сжатия в ж/б опорном кольце в ходе демонтажа металлоконструкций мембраны покрытия здания СКК «Петербургский» (бывший СКК им. В.И. Ленина 1980 г. постройки) приведена на рис. 2. Согласно работе [25] покрытие здания выполнено «стальной провисающей мембраной в виде сегмента сферической поверхности» со строительным подъемом краев сегмента 10 м. Полотнища «лепестков» закреплены к радиальным и кольцевым тавровым ребрам (к «постели») и к обечайке мембраны болтами. Радиальные швы полотнищ соединены горячей клепкой $d16$ мм через накладки. Согласно имеющимся данным, в ПД СКК-Э1-ПОД1 на реконструкцию спортивно-концертного комплекса были запроектированы в дополнение к ликвидации прочих частей сооружения — демонтаж покрытия и снос каркаса здания, состоящего из монолитного железобетонного опорного кольца, а также колонн с жестким армированием при установленной обследованием оценке их состоянии как «ограниченно работоспособное». Схема (рис. 2) ограничивает способы производства работ по демонтажу мембраны, но при этом определяет наиболее рациональный подход к сносу здания на основе совместной работы каркаса и покрытия по запроектированной конструктивной схеме.

Комментарий к схеме. При срезанных анкерах № 3–13 (10 % всех анкеров) в момент срезки анкера № 2 $F_{\text{сж}}$ и $-F_{\text{сж}}$ составляющие усилий сжатия в бетоне кольца перестали компенсировать друга и перешли в перерезывающие силы на концах дуги демонтированного участка. С учетом импульса удара $S_{\text{уд}} = \int F dt$ («глухого рывка») от резкого проседания на $\sim 1,5$ м за $\sim 0,05$ с массы отсоединенного участка мембраны (рис. 2) сила рывка увеличится не менее чем на 5 %, что показывает не менее чем 15–20 % запаса надежности здания по работе бетона опорного кольца на сжатие, определяемого его шириной 5 м, толщиной и маркой бетона. Согласно рис. 2 запас надеж-

⁸ ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.

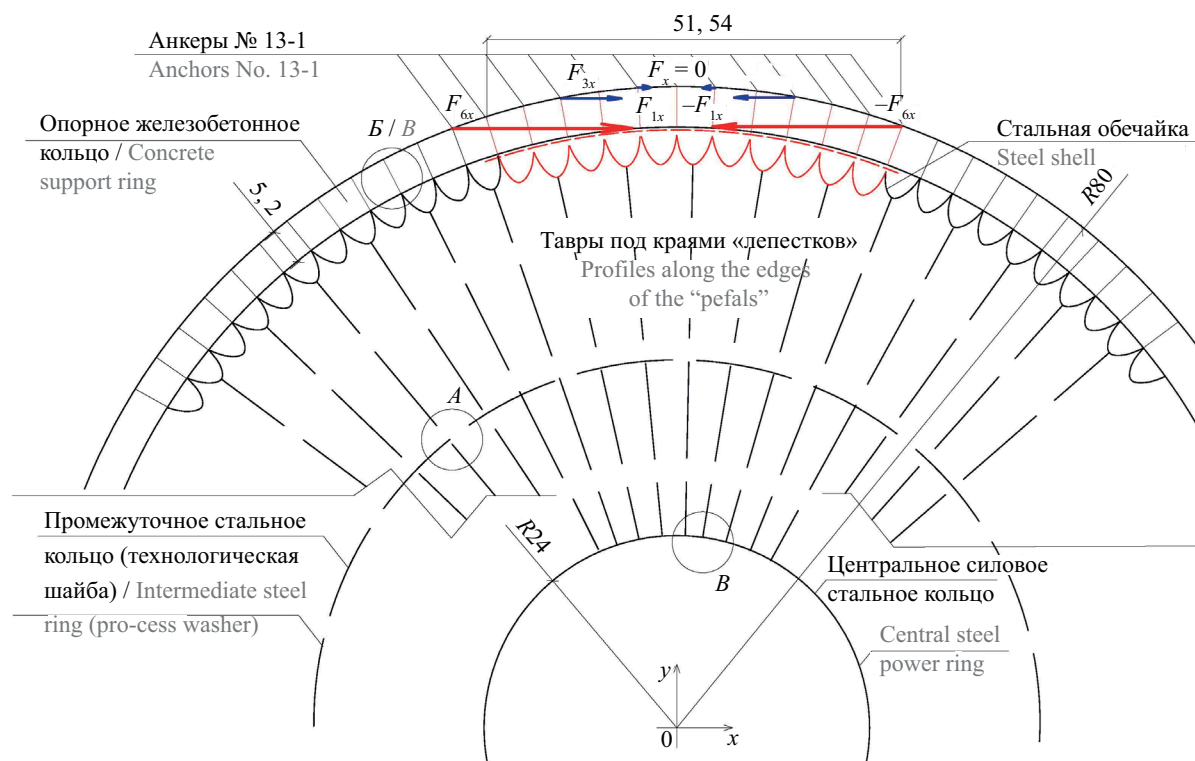


Рис. 2. Схема изменения усилий сжатия в ж/б опорном кольце в ходе срезания анкеров при ликвидации покрытия

Fig. 2. Diagram showing the variation in compressive forces in the reinforced concrete support ring during anchor cutting in the course of roof covering dismantling

ности по работе анкеров не менее 6-кратного. Запас надежности по работе и техническое состояние мембраны можно оценить по видеоматериалам, имеющимся в сети. Судя по отсутствию смещения и деформаций «лепестков», деформаций ребер мембраны после падения и сохранению покрытием целостности в отвесном (не расчетном) положении, состояние покрытия представляется вполне работоспособным.

Если вести речь об обосновании принципиального решения наиболее безопасной ОТС демонтажа покрытия, то таковым является последовательное применение в начале способа одновременного подрыва узлов «В» (аналогичных узлам «Б») соединения радиальных ребер и центрального силового кольца мембраны, с последующим срезанием анкеров в узлах «Б» и растаскиванием тракторами и резких металлоконструкций вниз. На все работы при хорошей организации можно отвести дней 5–7.

Если исключить из ОТС взрывные работы (т.е. серьезное усложнение согласований такого решения), а также высокую вероятность ошибки определения числа подрываемых узлов, достаточного для гарантированного обрушения покрытия, при котором оставшиеся узлы в силу своей высокой надежности (что следует из анализа видео) могут удерживать покрытие в зависании после подрыва, то на основании анализа схемы узла «Б» (рис. 3) с учетом рис. 2 обосновать и оформить ОТС демонтажа покрытия достаточно просто. Обоснование будет выглядеть как нумерованный список пространственно-техно-

логической последовательности выполнения рабочих операций единственного техпроцесса.

Пространственно-технологическая последовательность выполнения рабочих операций по демонтажу покрытия.

1. Разгрузить анкеры в узлах «Б» сносом наиболее удобных для этого элементов покрытия весом до (?) % покрытия из: числа «лепестки», элементы постели или аэрационного фонаря. То есть обеспечить снижение возможных предельных усилий в анкерах и в бетоне кольца на те же (?) % при предстоящей просадке мембраны в промежуточное положение.

2. Проходом по всем анкерам узлов «Б» вертикальными надрезами до оси штифтов 3 (рис. 3) ослабить проушины 2, преобразовав характер их работы в соответствующий крюкам. Постоянно следить за признаками начала разгибания «крюков». Если положение покрытия не изменяется, повторить проход, надрезая проушины 2'. То есть последовательно обеспечивать снижение на 25 %, затем еще на 25 % возможных предельных усилий в анкерах и в бетоне кольца при просадке мембраны.

3. Если положение покрытия не изменяется, повторить операции п. 2 с проушинами 2, т.е. обеспечивать снижение еще на 25 % возможных предельных усилий в анкерах и в бетоне кольца при просадке мембраны.

Далее — фрагмент ОТС

Если в какой-то момент работ по пп. 2 и 3 возникнут признаки разгибания крайнего в монтажном

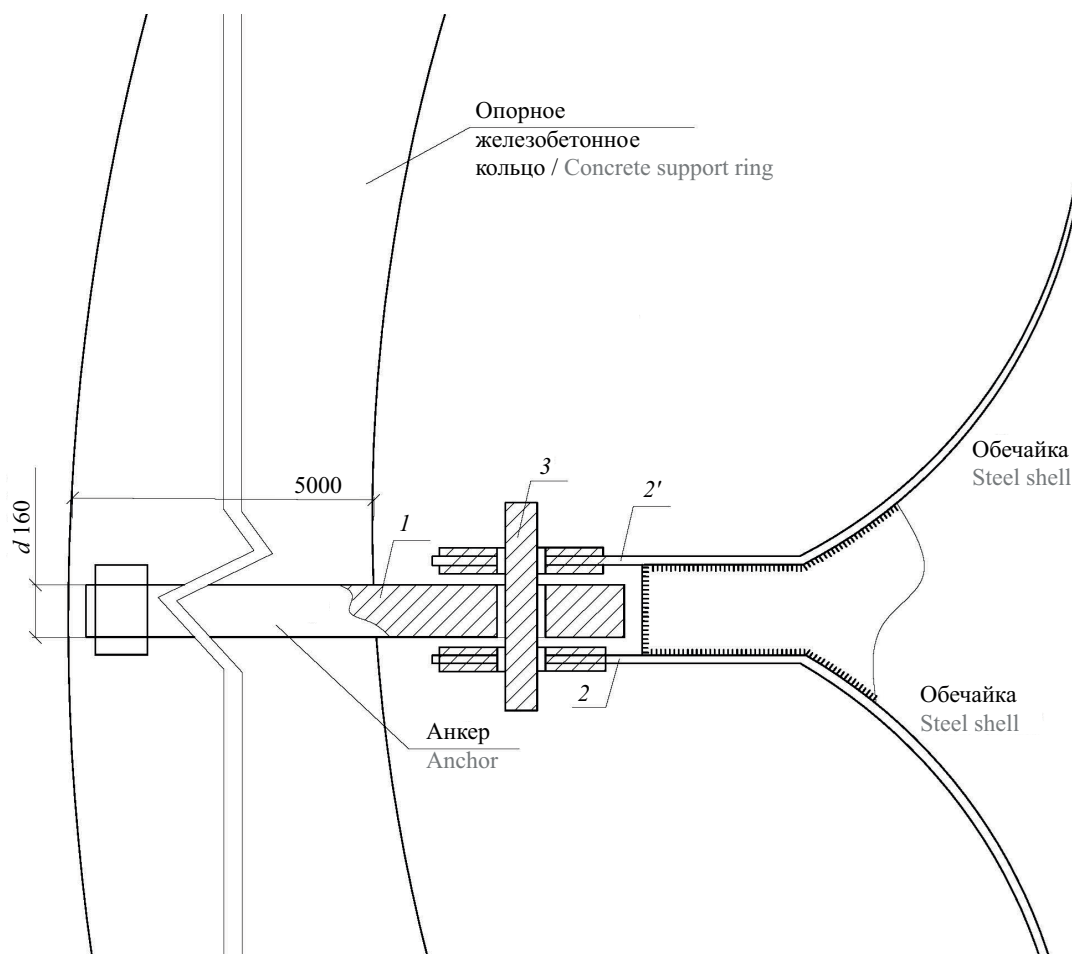


Рис. 3. Схема узла «Б»

Fig. 3. Node B diagram

пролете (надрезаемого) «крюка» (медленное раскрытие надреза, звуки, издаваемые конструкциями покрытия, меняющего свое положение и прочее), надрезы следующего анкера узла «Б» выполнять только после наблюдения за скоростью разгибания проушины анкера и принятия соответствующего решения руководителем работ.

Далее — снова обоснование

4. Прервать работы с началом лавинообразного разгибания «крюков» анкеров узлов «Б» до завершения тормозимого разрушением узлов соединения элементов «постели» и «полотнищ» проседания части мембраны до относительной отметке +0,0 (не более половинного веса).

5. Срезать оставшиеся анкера узла «Б».

Что касается способа ликвидации покрытия, описанного в последовательности, имеем *снос* (?) % элементов покрытия из числа аэрационный фонарь, «лепестки», «постель» (если сбрасывание отсоединенных элементов можно считать сносом), а также *демонтаж* покрытия в сборе. Следует заметить, что применение метода «снос» к стальным конструкциям подходит мало. В подавляющем числе случаев выполняют демонтаж с элементами сноса, что технологичнее. В основном используют заваливание, вы-

вешивание с последующим разрезанием конструкции на земле и т.п.

В рассмотренном примере мы имеем ликвидацию покрытия путем постепенного ослабления (*модифицированного демонтажа*) анкеров с последующим обрушением (*сносом*) части покрытия. То есть в примере используются: *модифицированный метод демонтажа* части анкеров, *снос* части покрытия обрушением, а также *метод полного демонтажа* (резка и разборка) оставшейся в проектных отметках части анкеров, а также покрытия на относительной отметке +0,0.

Таким образом, выполненное обоснование ОТС выявило еще один специфический принцип ликвидации сооружения — принцип постепенного уменьшения усилий в узлах конструкций.

В рассмотренном примере способа ликвидации сооружения содержание общей ОТС совпадает с содержанием как объектной ОТС, так и с содержанием раздела техкарты «Технология и организация работ» из состава ППР, за исключением схемы организации рабочего места монтажников.

Пример 3. Обоснование общей ОТС выполнения простых техпроцессов в составе комплексного тех-

процесса устройства проема во внутренней стене при реконструкции здания.

В этом случае при обосновании ОТС следует использовать уравнение (3), принцип «исключение перераспределения усилий» (в кладке над проемом) и принцип «минимально необходимое количество выполняемой механической работы» (в контексте исключения исправлений, трудоемкой подгонки элементов в обеспечение их надежной совместной работы) [26]. Схема оОТС приведена на рис. 4.

Рис. 4 является рациональной формой представления оОТС выполнения двух техпроцессов, содержащей необходимую детализацию описания ОТР пространственно-технологической последовательности проведения работ в границах рабочего места монтажников. ОТС (рис. 3) является «общей» (оОТС) в структуре ОТС, так как ее п. 7 содержит ссылку на «частную» чОТС подачи в проектные отметки с двух сторон стены вручную двумя монтажниками

двух швеллеров весом по 36 кг длиной 2,8 м. Графическое представление, выполненное в произвольном масштабе, содержит привязочные размеры, характеризующие масштабность рабочего места по отношению к монтируемой конструкции. Изображение монтажника М2 указывает на необходимость использования (и изготовления нетиповых) средств подмащивания.

В качестве обоснования приведенной в примере 3 общей ОТС производства работ (совмещения двух немеханизированных техпроцессов) может выступать критерий минимизации выполняемой механической работы при подаче, выверке, временном раскреплении конструкций:

$$A = \sum_{n=1}^N \int_l \vec{F}_n dl_n \rightarrow \min$$

и/или требование обеспечения надежной совместной работы стальной обоймы и кирпичной кладки, и/или ограничение численного состава монтажников,

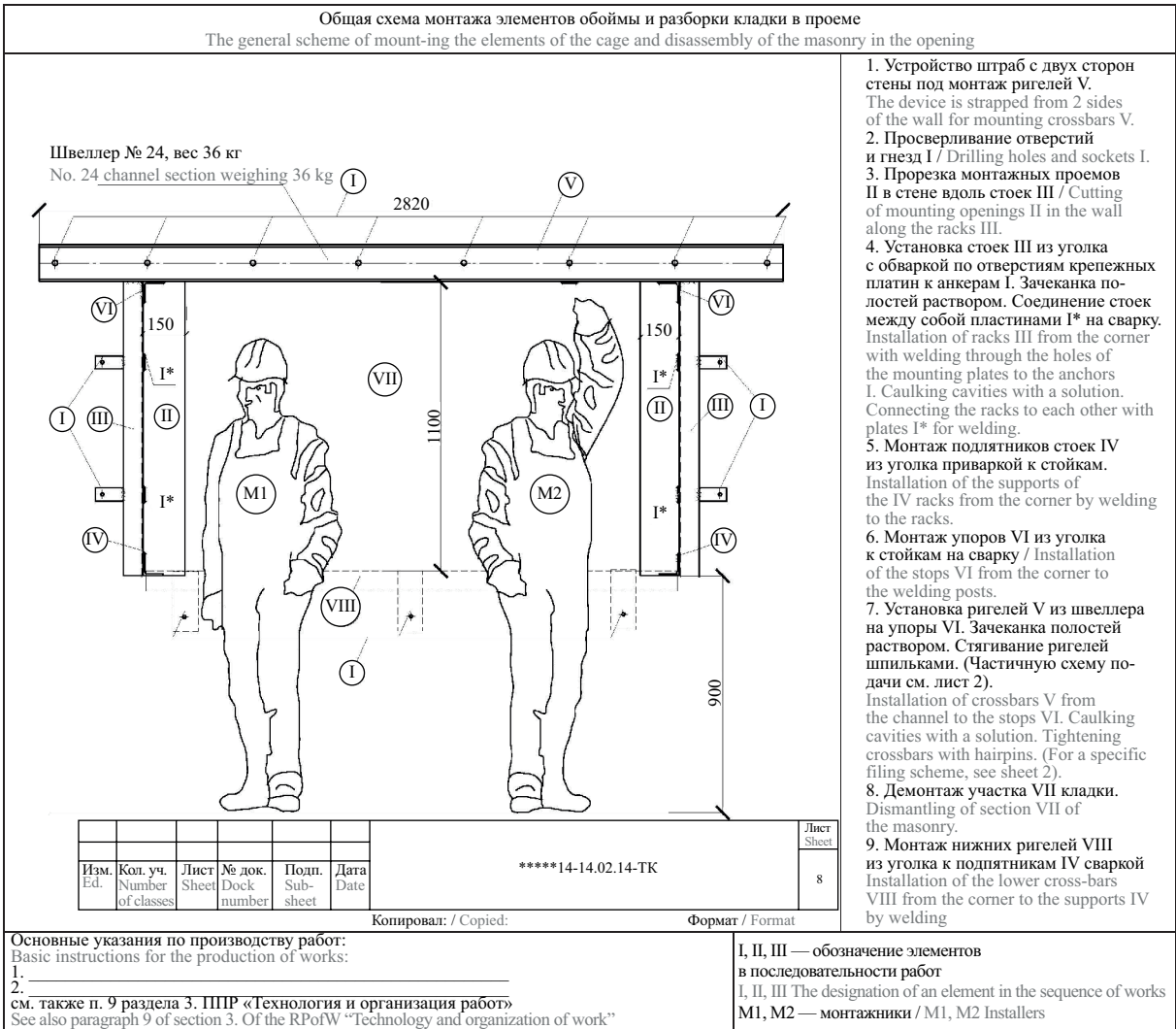


Рис. 4. Пример общей (оОТС) выполнения работ в составе двух совмещаемых техпроцессов устройства стальной обоймы и разборки кирпичной кладки стены

Fig. 4. Example of a general organizational and technological scheme for the installation of a steel cage and the dismantling of brick masonry in a wall as two combined technological processes

а также иные соображения. При этом во всех случаях принципиальные и предварительные решения ОТС анализируются разработчиком с точки зрения безопасной эксплуатации механизмов, безопасных методов выполнения рабочих операций, сохранности строительной готовности сооружения, а также окружающей застройки, что также должно найти отражение в обосновании ОТС.

В остальных, не рассмотренных в статье, случаях ОТС может быть оформлена по аналогии с рис. 1 и рис. 4: графическое представление элементов объекта (конструкций) в актуальных отметках с условными обозначениями элементов (отражающими пространственную последовательность работ), «жестко связанное» с условными обозначениями, или позициями нумерованного списка техпроцессов, или рабочих операций, или ОИМ, в пунктах которого (по необходимости) приводят ссылки на условные обозначения элементов в графическом представлении, отражающие пространственно-технологическую последовательность работ и сопровождаемые основными указаниями по производству работ и специальными указаниями по технике безопасности. Графическое представление проводится в произвольном масштабе на основе в общем случае сочетания фрагментов чертежей марок АР, КР, плана, и/или разреза сооружения, стройгенплана, СПОЗУ, или их компоновки на листе ОТС.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Дана инженерная интерпретация понятию «организационно-технологическая надежность строительства», позволившая установить зависимость основных технических параметров этого теоретического представления от содержания ПОС, ПОР, ППР, а также от отдельных положений нормативно-правовых документов, указанных в статье.

2. Рассмотрены подходы к обоснованию ОТС и выбору методов производства работ, использующие различные принципы в конкретных случаях производства работ, в том числе фундаментальные принципы механики, принцип рационального изменения совместной работы конструкций и отдельных их элементов в конструктивной системе сооружения, принцип рациональности баланса соотношений параметров выполнения техпроцессов и параметров текущей строительной готовности сооружения в его локальных отметках. Для обоснования ОТС введено понятие «пространственно-технологическая последовательность работ», предусматривающее описание единого порядка выполнения техпроцессов и обеспечивающее инженерные мероприятия в локальных отметках сооружения. Применение указанных принципов и введенного понятия проиллюстрировано примерами конкретных случаев производства работ.

3. Обоснован порядок формирования: структуры, обоснования и содержания ОТС. Введены понятия «структура ОТС», «частная» и «общая» ОТС.

На основании рассмотренных примеров конкретных случаев производства работ установлены рациональные формы представления ОТС в п. «з» раздела ПОС, а также в ПОР, ППР, техкартах. Отмечено, что структуру и содержание ОТС формирует разработчик ПОС, ПОР на основании анализа значительного числа данных из различных разделов ПД.

4. Обозначены границы детализации как описания *принципиальных* решений по организации и технологии работ в составе ПОС, так и описания способов их технической реализации в составе ППР и в техкартах. Отмечено, что в некоторых случаях возведения/ликвидации сооружений необходимо комбинировать уровень детализации описания принципиальных и технических решений с целью предотвращения методического разрыва ПОС, ПОР и ППР, влекущего потерю значимой для подрядчиков и экспертов информации.

5. Упорядочено применение понятий нормативной документации «снос», «демонтаж», «ликвидация», «производство работ», «организационно-технологическая схема». Отмечен ряд противоречий и неопределенностей в применении указанных понятий нормативной документацией, что затрудняет принятие и оформление проектных решений в составе ПОС и ПОР, а также их анализ экспертами.

6. Отмечена нормативно-методическая неопределенность связи содержания рекомендаций в составе заключений об обследовании сооружений с целями обследования, а также с направленностью последующего проектирования. Отмечено, что наличие в материалах обследования восстановленной схемы, а также прогноза возможных неблагоприятных изменений в работе конструкций в ходе их ликвидации, является наиболее квалифицированным источником для обоснования метода работ по ликвидации (части) сооружения.

7. Рассмотренный пример 2 позволяет отметить следующее:

- подход к ликвидации здания СКК на основе использования характера работы элементов в конструктивной системе этого уникального сооружения выбран подрядчиками вполне обосновано, но технологическая последовательность выполнения рабочих операций не учитывала как большого запаса надежности анкеров и мембраны по отношению к ж/б кольцу, так и ограничений, накладываемых схемой на рис. 2 на пространственную последовательность работ;

- своевременная квалифицированная реакция руководителя работ на отклонения изменения динамики конструкций от расчетной ситуации также является существенным элементом обеспечения ОТН в период СМР. Если бы руководитель был на месте работ, то после срезки двух-трех соседних анкеров мог оценить их состояние и состояние мембраны как исправное, или даже сверхисправное по отсутствию деформаций при кратном увеличении воспри-

нимаемой нагрузки и спрогнозировать деформацию и разрушение опорного ж/б кольца. При отсутствии признаков начала деформаций в опорном ж/б кольце, или в крайних анкерах участка отсоединенной мембраны, а также в конструкции отсоединенного участка мембраны при срезанных двух-трех анкерах (по аналогии с методом разрушающего контроля надежности системы каркас-мембрана) следовало остановить работы и совместно с проектировщиками уточнить технологическую последовательность работ на основе анализа (подобно показанному на рис. 2) перераспределения усилий в ж/б опорном конце, а также в отсоединенном участке мембраны, которые в этот момент начинали менять схему своей работы;

- схема организации рабочего места монтажников, конечно, должна быть иной, чем зафиксированная на видео;

- наименее затратным методом ликвидации сооружения, основанном на работе элементов его конструктивной системы, является разрушение микровзрывами 13–15 соседних анкеров покрытия, позволяющее одновременно переместить с отметки +40,0 на отметку +0,0 до 95 % конструкций ж/б каркаса и покрытия.

Как показывает рассмотренный пример 2, оформление оОТС в данном случае весьма простое, не требует графического материала, выполнено в виде нумерованного списка и отличается от обОТС, т.е. от описания пространственно-технологической последовательности работ отсутствием теоретического и графического материала (схемы на рис. 2, общие формулы, указания % ослабления усилий в бетоне кольца и т.п.). В составе ППР обОТС должна содержать краткое описание *особенностей* рабочего места, необходимых механизмов, а также *специальных* требований по безопасности работ. В рассмотренном случае восстановление схемы (рис. 2) является как методом получения исходных данных для разработки обОТС, так и инструментом проверки правильности выполняемого обоснования. В качестве обоснования приведенной в примере 2 объектовой ОТС ликвидации покрытия в п. «з» раздела ПОС могут быть приняты расчеты по выражениям (1), (2), исходные данные в составе схем на рис. 2, 3 и ряд положений аналитического характера, доказывающих безопасность и рациональность принятой обОТС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обеспечение ОТН строительства осуществляется в два этапа: в период разработки и экспертизы ПОС и в основной период строительства. Ключевыми методами обеспечения ОТН на первом этапе являются обоснование структуры, разработка ОТС строительства, а также инженерно выверенные формулировки положений нормативно-правовой документации.

Предложенные в статье методы обоснования, структура и смысловая нагрузка ОТС, а также на-

глядная и понятная подрядчикам и экспертам форма ее представления позволяют как скоординировать производство работ в актуальных отметках сооружения, так и выявить (спрогнозировать) вероятные отклонения в выполнении техпроцессов и способы их предотвращения, установить технологическую последовательность и порядок контроля выполнения ключевых рабочих операций техпроцессов, т.е. повышают ОТН строительства.

Обоснование и оформление ОТС в составе ПОС (ПОР), ППР, техкарты, выполненные по предложенным в статье подходам, определяют *как рациональность и безопасность принимаемых решений* по совмещению техпроцессов и ОИМ в локальных отметках сооружения, допустимое сближение рабочих мест различных техпроцессов на границах смежных захваток (фронтов), *так и продолжительность возведения части сооружения* и, соответственно, сооружения в целом, что отражается в календарном графике и, в конечном счете, определяет значимую составляющую инженерной части ОТН.

Структура, содержание и оформление ОТС в составе ПОС, ППР, техкарт зависят исключительно от архитектурных решений, конструктивного типа, строительной готовности (части) сооружения и выполняемых техпроцессов. Это обстоятельство позволяет оформить, например, объектовую ОТС в виде простого нумерованного списка выполнения ключевых рабочих операций и обеспечивающих инженерных мероприятий (см. пример 2 ликвидации покрытия). В то же время в составе ППР (техкарты) ОТС выполнения нескольких совмещаемых техпроцессов и обеспечивающих инженерных мероприятий при возведении части сооружения требует оформления значительного объема текстово-графического материала в структуре «общая ОТС – необходимое число частных (разъясняющих) ОТС» (см. пример 3). Форма ОТС должна быть рациональной для представления принципиальных решений по организации работ в составе ПОС и для их детализации техническими решениями в ППР и техкартах.

Название п. «з» раздела ПОС «обоснование ОТС...» в настоящее время может трактоваться в неопределенно широком смысле, а его содержание включать различные логики выстраивания цепочек аргументов научно-теоретического, технологического, организационно-управленческого, архитектурно-конструктивного, экономического, производственно-технического характера, вплоть до «обычая делового оборота», или формального описания (справочного характера) работ подготовительного и основного периодов календарного графика. Без нормативного перечня главных положений обоснований ОТС их обоснованность будет оставаться весьма уязвимой. Пункт «з» «обоснование ОТС...» раздела ПОС, кроме обоснования, должен содержать и объектную ОТС строительства, а п. «к» — общие ОТС № 1–3,

что и явится оформлением структуры ОТС в составе ПОС.

Для преодоления противоречия в названии и содержании документов, разрабатываемых с учетом МДС 12-64.2013⁴ «Типовой проект организации работ на демонтаж (снос)...», указанные документы

целесообразно назвать «Проект организации работ по ликвидации...».

Материал настоящей статьи может быть использован при разработке ПОС, ПОР, ППР и техкарт, а также при корректировке нормативно-правовых актов и методической документации в области строительства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Михальченко О.Ю. Организационная надежность планирования строительства объектов : дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2012. 150 с. EDN QFXDWZ.

2. Легостаева О.А. Совершенствование организационно-технологической надежности строительных процессов в инженерных проектах : дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2007. 203 с.

3. Кузнецов П.А. Организационно-технологическая надежность ресурсного обеспечения строительного переустройства аварийных объектов : дисс. ... д-ра техн. наук. М., 2006. 426 с. EDN NOGKCT.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Кужин М.Ф., Алхамд А. Исследование организационно-технологических решений при сносе (демонтаже) зданий и сооружений // Строительное производство. 2022. № 2. С. 57–60. DOI: 10.54950/26585340_2022_2_57. EDN JVRAQI.

8. Лapidус 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.

9. Лapidус 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.

10. 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.

11. Теличенко В.М., Терентьев О.М., Лapidус А.А. Технология возведения зданий и сооружений. М. : Высшая школа, 2004. 445 с.

12. Атаев С.С., Данилов Н.Н. Технология строительного производства : учебник. М. : Стройиздат, 1984. 559 с.

13. Шуберт М.М. Монтаж металлических конструкций. М. ; Л. : Госстройиздат, 1939. 520 с.

14. Гофштейн Г.Е., Ким В.Г., Ниццев В.Н., Соколова А.Д. Монтаж металлических и железобетонных конструкций. М. : Стройиздат, 2004. 528 с.

15. Юдина А.Ф., Верстов В.В., Бадьин Г.М. Технологические процессы в строительстве. М. : Академия, 2013. 21 с.

16. Лагранж Ж. Аналитическая механика. Т. 1. М. ; Л., 1950. 598 с.

17. 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.

18. Теличенко В.И., Лapidус А.А., Морозенко А.А. Информационное моделирование технологий и бизнес-процессов в строительстве. М. : Издательство АСВ, 2008. 144 с. EDN SAPKVZ.

19. Сокольников В.В. Моделирование организационно-технологической надежности строительства // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 4 (69). С. 92–97. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-4-92-97. EDN YLHKRN.

20. Месарович М., Марко Д., Такахара Я. Теория иерархических многоуровневых систем. М. : Мир, 1973. 344 с.

21. Корт Д., Липпок Ю., Денсхаймер Р. Организация работ по сносу зданий / пер. с нем. М. : Стройиздат, 1983. 115 с.

22. Пледжер Д. Техника сноса зданий / пер. с англ. М. : Стройиздат, 1981. 58 с.

23. Разживин Ю.М. Разборка зданий Л. : Стройиздат, 1978. 56 с.
24. Иванов И.Т. Разборка зданий. М. ; Л., 1946. 67 с.
25. Шериевский И.А. Конструирование гражданских зданий. М. : Архитектура-С, 2005. 175 с.

26. Сокольников В.В. Организационно-технологические решения выполнения строительных процессов и их комплексов в условиях ограничений, накладываемых проектными решениями сооружений : учебное пособие. СПб. : СПбГАСУ, 2020. 120 с.

Поступила в редакцию 12 февраля 2026 г.

Принята в доработанном виде 2 мая 2026 г.

Одобрена для публикации 26 мая 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: **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., д. 9; РИНЦ ID: 526448, Scopus: 57202821958, ResearcherID: ABA-8338-2021, ORCID: 0000-0003-3768-2079; vschief@yandex.ru.

REFERENCES

1. Mikhalchenko O.Yu. *Organizational reliability of planning the construction of facilities : diss. ... candidate of technical sciences*. Novosibirsk, 2012; 150. EDN QFXDWZ. (rus.).
2. Legostaeva O.A. *Improvement of organizational and technological reliability of construction processes in engineering projects : diss. ... candidate of technical sciences*. Novosibirsk, 2007; 203. (rus.).
3. 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.).
4. 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.).
5. 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.).
6. 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.).
7. Kuzhin M.F., Alhamd A. Study of organizational and technological solutions for the demolition (dismantling) of buildings and structures. *Construction Production*. 2022; 2:57-60. DOI: 10.54950/26585340_2022_2_57. EDN JVRAQI. (rus.).
8. 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 technological 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.).
9. 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.).
10. 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.).
11. Telichenko V.M., Terentyev O.M., Lapidus A.A. *Technology of construction of buildings and structures*. Moscow, Higher School, 2004; 441. (rus.).
12. Ataev S.S., Danilov N.N. *Technology of construction production : textbook*. Moscow, Stroyizdat, 1984; 559. (rus.).
13. Schubert M.M. *Installation of metal structures*. Moscow; Leningrad, Gosstroyizdat, 1939; 520. (rus.).
14. Gofstein G.E., Kim V.G., Nishchev V.N., Sokolova A.D. *Installation of metal and reinforced concrete structures*. Moscow, Stroyizdat, 2004; 528. (rus.).
15. Yudina A.F., Verstov V.V., Badin G.M. *Technological processes in construction*. Moscow, Academy, 2013; 21. (rus.).
16. Lagrange J. *Analytical mechanics*. Vol. 1. Moscow; Leningrad, 1950; 598. (rus.).
17. 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.).
18. 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.).

19. Sokolnikov V.V. Modeling of organizational and technological reliability of construction. *Bulletin of Civil Engineers*. 2018; 4(69):92-97. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-4-92-97. EDN YLHKRN. (rus.).

20. Mesarovich M., Marko D., Takahara Ya. *Theory of hierarchical multi-level systems*. Moscow, Mir, 1973; 344. (rus.).

21. Kort D., Lippock Y., Densheimer R. *Organization of demolition work (translated from German)*. Moscow, Stroyizdat, 1983; 115. (rus.).

22. Pledger D. *Demolition techniques (translated from English)*. Moscow, Stroyizdat, 1981; 58. (rus.).

23. Razzhivin Yu.M. *Disassembly of buildings*. Leningrad, Stroyizdat, 1978; 56. (rus.).

24. Ivanov I.T. *Disassembly of buildings*. Moscow; Leningrad, 1946; 67. (rus.).

25. Shershevsky I.A. *Construction of civil buildings*. Moscow, Architecture-S, 2005; 175. (rus.).

26. Sokolnikov V.V. *Organizational and technological solutions for the implementation of building processes and their complexes under the constraints imposed by design solutions for structures : textbook*. St. Petersburg, SPbGASU, 2020; 120. (rus.).

Received February 12, 2026.

Adopted in revised form on May 2, 2026.

Approved for publication on May 26, 2026.

B I O N O T E S : **Vladimir V. Sokolnikov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Structures, Buildings and Facilities; **Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS)**; 9 Moskovsky prospekt, St. Petersburg, 190031, Russian Federation; ID RSCI: 526448, Scopus: 57202821958, ResearcherID: ABA-8338-2021, ORCID: 0000-0003-3768-2079; vschief@yandex.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.05

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.1025-1040

Оптимизация размещения зданий на участках сложной формы методами искусственного интеллекта

Михаил Владимирович Гуреев¹, Вадим Игоревич Волощук²

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

² Южный федеральный университет (ЮФУ); г. Ростов-на-Дону, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается задача оптимизации размещения зданий на земельных участках сложной формы на ранних стадиях проектирования, когда исходные данные ограничены, а требования задаются системой геометрических ограничений и целевых показателей качества. Актуальность обусловлена высокой трудоемкостью ручной проработки вариантов и необходимостью объективного сравнения компоновочных решений при нерегулярной геометрии границ участка. Научная новизна состоит в формализации постановки задачи и сравнительном исследовании эвристических и интеллектуальных методов в едином вычислительном протоколе.

Материалы и методы. Экспериментальная база включает 79 объектов и сравнение 18 методов ИИ генерации и селекции планировочных решений. Для отбора вариантов применены регрессионные модели, обученные и проверенные с группировкой по объектам. Участки сложной формы моделировались синтетическими конфигурациями. Оценка решений выполнялась по интегральной целевой функции и системе штрафов за нарушения ограничений.

Результаты. Выделены модели ИИ, оптимальные для ранжирования вариантов при фиксированном вычислительном бюджете, которые обеспечивают устойчивое упорядочивание решений; для Random Forest достигнуты значения R^2 порядка 0,995–0,999. Выявлен практический компромисс между оптимальностью и допустимостью: доля допустимых решений существенно зависит от метода и режима селекции (в отдельных сценариях — около 39 против 99 %).

Выводы. Найдены оптимальные модели ИИ, предоставляющие возможность реализовывать генерацию вариантов планировочных решений для формирования массинг-моделей, расчет показателей качества и допустимости, а также сопоставление методов по единым правилам оценивания, позволяющее решать задачи управления показателями инвестиционно-строительного проекта на ранних этапах жизненного цикла объекта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оптимизация размещения, планировочная компоновка, участок сложной формы, целевая функция, штрафные ограничения, эвристические алгоритмы, методы искусственного интеллекта, ранняя стадия проектирования, устойчивость решений, вычислительный бюджет, показатели инвестиционно-строительного проекта

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гуреев М.В., Волощук В.И. Оптимизация размещения зданий на участках сложной формы методами искусственного интеллекта // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 6. С. 1025–1040. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.1025-1040

Автор, ответственный за переписку: Михаил Владимирович Гуреев, mvgureev@gmail.com.

Optimization of building placement on irregularly shaped land plots using artificial intelligence methods

Mikhail V. Gureev¹, Vadim I. Voloshchuk²

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

² Southern Federal University (SFedU); Rostov-on-Don, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This paper addresses the problem of optimizing building placement on land plots of complex shape at the early stages of design, when initial data are limited and the requirements are specified as a system of geometric constraints and quality targets. The relevance of the study stems from the high labor intensity of manually preparing layout alternatives and the need for an objective comparison of layout solutions for plots with irregular boundary geometry. The scientific novelty of the study lies in the formalization of the problem statement and the comparative study of heuristic and intelligent methods within a single computational protocol.

Materials and methods. The experimental dataset includes 79 objects and covers the comparison of 18 AI methods for generating and selecting planning solutions. Regression models were used to select alternatives; these models were trained and verified by grouping the objects. Complex-shaped areas were modeled using synthetic configurations. The solutions were evaluated using a composite objective function and a system of penalties for constraint violations.

Results. The results identify AI models that are optimal for ranking alternatives under a fixed computational budget and provide a stable ordering of solutions. For Random Forest, the achieved R^2 values are in the range of 0.995–0.999. A practical compromise between optimality and admissibility was identified, with the proportion of admissible solutions being significantly affected by the selection method and mode, ranging from approximately 39 to 99 % in certain scenarios.

Conclusions. The study identified optimal AI models that enable the generation of planning solutions, the calculation of quality and admissibility indicators, and the comparison of methods using unified evaluation rules. This supports the early-stage assessment and management of investment and construction project indicators.

KEYWORDS: placement optimization, site layout planning, irregular plot, objective function, penalty constraints, heuristic optimization, artificial intelligence, early-stage design, solution robustness, computational budget, investment and construction project indicators

FOR CITATION: Gureev M.V., Voloshchuk V.I. Optimization of building placement on irregularly shaped land plots using artificial intelligence methods. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(6):1025-1040. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.1025-1040 (rus.).

Corresponding author: Mikhail V. Gureev, mvgureev@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, руководством Правительства РФ сформулированы ключевые цели развития строительной отрасли¹ — комфортная и безопасная среда для жизни и цифровая трансформация. Одна из базовых задач стратегии для реализации поставленных целей — повышение комфортности и улучшение качества городской среды, эффективности использования земельных участков. Значимым элементом управления показателями инвестиционно-строительного проекта (ИСП) является земельный участок. В современном строительстве оптимизация пространственного размещения зданий на участках различной формы критически важна для минимизации неиспользуемого пространства, максимизации площадей озеленения и обеспечения устойчивости территорий.

Формирование подходов по генеративному проектированию идет активными темпами. В условиях цифровой трансформации отрасли все более актуальным становится применение методов искусственного интеллекта (ИИ) для поддержки процесса принятия решений, позволяющих оптимизировать планирование и выполнение работ, сокращая сроки и затраты, а также уменьшить риски и непредвиденные ситуации через прогнозирование и превентивные меры и улучшить взаимодействие между участниками проекта, обеспечивая своевременный доступ к необходимой информации.

Искусственный интеллект дает возможность строительным компаниям сократить издержки за счет автоматизации повторяющихся задач, повышения точности расчетов и оптимизации расхода материалов. Благодаря внедрению подходов по оптимизации строительных процессов с помощью ИИ производительность труда выросла на 40 % (рис. 1), что подтверждает экономическую целесообразность использования технологий ИИ [1].

¹ Об утверждении Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства РФ на период до 2030 г. с прогнозом до 2035 г. : Распоряжение Правительства РФ от 31.10.2022 № 3268-р.

Таким образом, важен вопрос о возможности применения методов ИИ для создания массинг-моделей, привязанных к земельным участкам, для ИСП многоквартирных жилых зданий.

Сегодня при создании массинг-моделей определена необходимость в индивидуально-комплексном подходе, учитывающем композиционно-пространственную структуру территории внутри жилых кварталов/микрорайонов, с учетом совокупности планировочных характеристик территории, нормативных требований и форм собственности на объекты капитального строительства [2].

Современная оптимизация традиционных методов территориального проектирования предполагает внедрение подходов, основанных на анализе данных, обеспечивающих проверку соответствия нормативам и показателям в режиме реального времени. Такой подход позволяет не только выполнить разработку планировочных решений, но и провести оценку их эффективности, выполнить генерацию альтернативных вариантов, редактирование, контроль качества, экспорт и координацию работ [3].

Авторами [4] выделены ключевые задачи, решение которых возможно осуществлять с помощью ИИ, — планирование градостроительных процессов, прогнозирование показателей (сроки, стоимость, нагрузки на инфраструктуру) и комплексный мониторинг строительства, в том числе с уже разработанными решениями в таких сферах, как оценка недвижимости и прогнозирование сроков строительства.

Отдельно следует отметить, что в последние годы активно развиваются генеративные подходы, ориентированные на формирование альтернатив проектных решений и оптимизацию по совокупности критериев. К числу таких направлений относятся условные генеративно-состязательные сети и обобщенные постановки генеративно-состязательного обучения [5, 6], вариационные автокодировщики как вероятностные генеративные модели [7], диффузионные модели как класс генеративных моделей с итеративным уточнением распределения решений [8], а также архитектуры трансформеров, лежащие в ос-

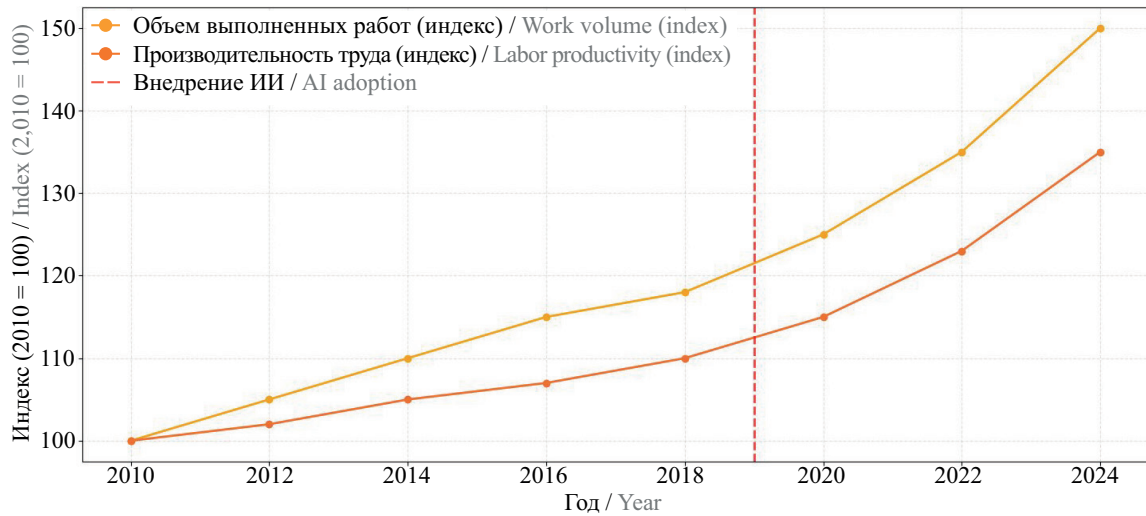


Рис. 1. Влияние ИИ на экономику строительной отрасли

Fig. 1. The economic effect of AI on the construction industry

нове современных языковых моделей и ряда генеративных систем, применяемых для поддержки проектных процедур [9]. Указанные подходы рассматриваются как перспективные для расширения множества генерируемых альтернатив и построения более сложных процедур оценки и ранжирования вариантов. Вместе с тем в рамках настоящего исследования акцент сделан на воспроизводимой вычислительной постановке с контролируемым набором показателей и ограничений, поэтому в части машинного обучения (МО) были апробированы преимущественно классические регрессионные модели, применяемые как инструмент отбора и ранжирования вариантов планировочных решений по целевым прокси-показателям, без генеративного синтеза геометрии.

Обобщая, можно сделать вывод, что методы ИИ активно внедряются в ИСП, что дает возможность последовательно повышать эффективность управления проектами. При этом остается востребованной экспериментальная база, позволяющая на едином протоколе сравнивать практико-ориентированные метрики (комфорт, инфраструктура, потенциальная доходность) для различных земельных участков.

Однако, по мнению ряда исследователей, технологии ИИ в архитектуре и градостроительстве представлены «слабым» ИИ и включают компьютерное моделирование, интеллектуальную поддержку принятия решений и другие алгоритмические функции. В перспективе есть теоретические разработки по созданию «сильного» ИИ, способного генерировать принципиально новые решения [10].

В рамках настоящего исследования ставится цель рассмотреть существующие модели ИИ и произвести на базе сравнения выбор оптимальной для формирования массинг-модели, привязанной к участку строительства для управления показателями ИСП.

Задачи исследования:

- рассмотреть существующие модели ИИ, выбрать подходящие для исследования;
- провести расчеты по выбранным моделям;
- проанализировать результаты и сделать вывод об оптимальной модели (группе моделей), укладывающейся в цель исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Решение поставленных задач реализовано на языке программирования Python и включает генерацию вариантов планировочного решения, вычисление метрик качества и допустимости, а также сравнение методов поиска по единым правилам оценивания. Используются методы, которые отражают типовую логику предпроектной проработки в строительстве: формирование наборов альтернативных компоновок, проверка ограничений и выбор рационального варианта по заданным показателям. Применение вычислительных методов целесообразно в ситуациях, когда требуется сопоставимо и в сжатые сроки оценить множество вариантов размещения корпусов на участке при наличии ограничений по отступам, плотности и интенсивности застройки, а также при необходимости одновременно учитывать несколько разнородных критериев. Отдельно отметим, что задача имеет прикладную потребность в масштабировании расчетов: на стадии выбора концепции стоит оценивать не единичное решение, а множество альтернатив — как для одного участка, так и для совокупности участков в рамках портфеля проектов. В этом контексте важны вычислительная трудоемкость методов и возможность получения результата в разумные сроки при фиксированном бюджете расчетов. Поэтому в работе рассматриваются подходы разной сложности — от быстрых схем построения и многостартового перебора до эволюционного поиска и ускоряющего ранжирования на основе МО,

что позволяет сопоставлять не только качество получаемых решений, но и их практическую применимость при массовом расчете вариантов [11–13].

Под планировочным решением далее понимается множество прямоугольных корпусов, размещаемых в пределах допустимой области участка с учетом ограничений. В задачах планировочного размещения распространены три группы подходов: 1) эвристические схемы (детерминированные и стохастические), позволяющие быстро получать набор вариантов; 2) методы МО, применяемые как приближенные модели или средства ускорения отбора наиболее перспективных вариантов из сформированного набора [11, 12]; 3) эволюционные алгоритмы многокритериальной оптимизации, обеспечивающие поиск компромиссных решений при конфликтующих целях [13]. Сильной стороной эвристических схем являются высокая скорость и простота интерпретации эволюционных алгоритмов — способность исследовать сложное про-

странство решений при наличии ограничений [13–15], методов МО — возможность использовать накопленные примеры для приоритизации вариантов и сокращения объема перебора. В прикладной постановке устойчивость результатов и риск недопустимости решений целесообразно трактовать как элементы надежности вычислительного процесса принятия решений, что согласуется с подходами к моделям надежности и рисков [14].

Для каждого планировочного решения рассчитывался набор показателей, характеризующих плотностные параметры, конфигурацию корпусов, обеспеченность разрывов между корпусами, контакт с периметром участка и соблюдение ряда ограничений. Используемые расчетные показатели приведены в табл. 1.

Сравнение проводилось по группе методов, определенным детерминированным схемам, которые задают размещение корпусов по заранее установленным

Табл. 1. Расчетные показатели, применяемые в вычислительном эксперименте

Table 1. Calculated indicators used in the computational experiment

Обозначение Notation	Формула Formula	Описание Description
M_1	$M_1 = \frac{S_{\text{пятна}/spots}}{S_{\text{уч}/ooch}}$	Коэффициент застройки: доля площади пятен застройки корпусов от площади участка Building coverage ratio: the ratio of the total building footprint area to the site area
M_2	$M_2 = fp \cdot floors$	Суммарная поэтажная площадь при заданной этажности Total gross floor area for the given number of storeys
M_3	$M_3 = \frac{M_2}{S_{\text{уч}/ooch}}$	Коэффициент интенсивности застройки: отношение суммарной поэтажной площади к площади участка Floor area ratio (FAR): the ratio of the total gross floor area to the site area
M_4	$M_4 = N_{\text{корп}/corp}$	Число корпусов (количество прямоугольников-корпусов в планировке) Number of buildings: the number of rectangular building footprints in the layout
M_5	$M_5 = mean \left(\frac{\max(w, h)}{\min(w, h)} \right)$	Средняя вытянутость корпусов по отношению сторон Mean building elongation: average aspect ratio of the building footprints
M_6	$M_6 = 1 \text{ нет разрывов / there are no gaps}$ $\max \left(0; \min \left(1; \frac{m_{\text{разр}} / section}{(0,5d_{\text{уч}} / ooch)} \right) \right)$ иначе / otherwise	Нормированный показатель межкорпусных разрывов: основан на минимальном разрыве, нормирование выполнено по диагонали участка Normalized inter-building spacing indicator: based on the minimum gap between buildings and normalized by the site diagonal
M_7	$M_7 = \frac{N_{\text{точеквkontakte}} / vkontaktepoints}{N_{\text{точеквсего}} / pointtofeverything}$	Доля точек периметра участка, попавших в зону контакта с корпусами Share of site-boundary points located within the building contact zone

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Обозначение Notation	Формула Formula	Описание Description
M_8	$c_i = (x_i, y_i)$ — центр i -го корпуса / the center of the i -th building; $\bar{c} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \right)$ — средний центр планировки / the middle center of the layout; $a = \operatorname{argmin} p \in \partial Sp - crVert$ — подключения на границе / connections at the border; $C = c_1, dots, c_N$ — определение множества центров / defining a set of centers; $M_8 = MST_{len}(C \cup a)$	Прокси-показатель протяженности инфраструктуры: длина минимального остовного дерева по центрам корпусов и точке привязки к границе Infrastructure length proxy: length of the minimum spanning tree constructed over the building centroids and the boundary connection point
M_9	$M_9 = \sum v_i$	Суммарный штраф нарушений ограничений (по группе проверяемых требований) Total constraint-violation penalty: aggregate penalty across checked requirements
M_{10}	$clamp(x; a; b) = \max(a, \min(b, x));$ $Score_{заст / застр} = 1 - clamp\left(\frac{M_1}{1 - r_{двор / yard}}; 0; 1\right);$ $Score_{инфр / инфр} = 1 -$ $- clamp\left(\frac{M_8}{d_{уч / ooch} \cdot \max(1, N_{корп / corp})}; 0; 1\right);$ $Score_{разр / category} = clamp(spacing_{norm}; 0; 1);$ $M_{10} = \frac{Score_{заст / застр} + Score_{инфр / инфр} + Score_{разр / category}}{3}$	Комплексная пространственная оценка как среднее трех нормированных составляющих. В данном случае — минимальная доля дворовой/открытой территории Composite spatial score as the mean of three normalized components; here, includes the minimum share of courtyard/open space
S_1, S_2, S_3	$b_i \in Score_{инфр / инфр}, Score_{разр / category}, Score_{заст / застр}$ $S = \sum (b_i \cdot w_i)$	Сценарные оценки (доходность/инфраструктура/комфорт): взвешенная сумма компонент Scenario scores: weighted sums of the profitability, infrastructure, and comfort components.
K_1	$Delta = 0; v \leq 0; \min\left(0, 15, \frac{v}{800}\right) v > 0$ $K_1 = clamp(0,30 + 0,50 \cdot b_i - Delta; 0,20; 0,90)$	Целевой показатель для сопоставления методов при максимизации Target metric for comparing methods under maximization
K_2	$K_2 = S_{уч / ooch} / M_2, M_2 = 0 \rightarrow K_2 = INF$	Целевой показатель для сопоставления методов при минимизации Target metric for comparing methods under minimization

правилам и различаются степенью структурированности компоновки и вычислительной трудоемкостью. Во всех случаях планировочное решение представлялось множеством прямоугольных корпусов, размещаемых в пределах допустимой зоны с учетом отступов и проверок ограничений [16, 17]. Для каждого сформированного решения вычислялись показатели и комплексные оценки, приведенные в табл. 1; допустимость фиксировалась суммарным штрафом нарушений M_1 – M_9 .

Линейная застройка формирует один или несколько продольных корпусов, ориентированных вдоль выбранной оси участка. Корпуса размещаются внутри допустимой зоны, их габариты подбираются с ориентацией на достижение целевых значений коэффициента застройки M_1 и коэффициента интенсив-

ности M_3 при заданной этажности. При необходимости размещения нескольких параллельных корпусов задается фиксированное нормированное расстояние между ними, контролируемое показателем межкорпусных разрывов M_6 . При нарушении геометрических и нормативных ограничений решение относится к недопустимым, что отражается увеличением M_9 .

Линейная застройка вдоль границы формирует вытянутые корпуса, располагаемые вблизи границы допустимой зоны с соблюдением отступов. В отличие от простой линейной застройки, где определяющим является выравнивание вдоль внутренней оси, в данном случае приоритет отдан размещению вдоль периметра, что обычно приводит к росту доли контакта застройки с границей, характеризуемой показателем M_7 . Подбор размеров и числа корпусов также ориентиро-

ван на достижение целевых значений M_1 и M_3 при контроле межкорпусных разрывов M_6 и штрафа нарушений M_9 .

Сеточная застройка реализует размещение корпусов на регулярной сетке, построенной в пределах допустимой зоны. Кандидатные положения корпусов задаются узлами (или ячейками) сетки, после чего выполняется перебор допустимых размещений с учетом отступов и минимальных разрывов. Это гарантирует воспроизводимость результатов и формирование набора альтернатив без случайных факторов, однако точность компоновки и достигаемые значения M_1 и M_3 зависят от шага сетки, а ограничение по разрывам отражается через M_6 .

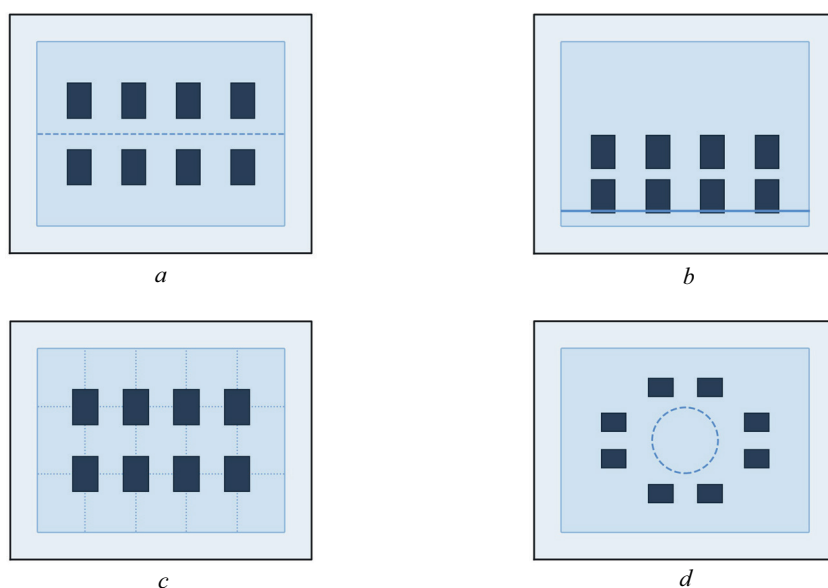
Периметральная застройка с двором формирует застройку по контуру допустимой зоны с созданием внутреннего незастроенного пространства. Построение направлено на сохранение центральной открытой зоны, соответствующей требованию минимальной доли дворового пространства, при одновременном согласовании плотностных характеристик M_1 и M_3 . В зависимости от формы участка допускается замкнутая или частично разомкнутая конфигурация периметра. Если при заданных ограничениях обеспечить необходимое дворовое пространство или соблюдение отступов и разрывов невозможно, решение относится к недопустимым и фиксируется ростом M_9 .

Дополнительно использовалась случайная застройка, предназначенная для формирования разнообразного набора планировочных решений без фиксированного шаблона размещения. В этой схеме параметры корпусов (число, габариты и положение) задаются случайным образом в пределах допустимой зоны, после чего выполняется проверка ограничений по отступам и межкорпусным разрывам. Для каждого сформированного варианта рассчитываются показатели M_1 – M_9 и фиксируется штраф нарушений M_9 ; при наличии нарушений решение рассматривается

как недопустимое. Случайная компоновка применяется как базовая линия сравнения и как источник множества альтернатив при ограниченном вычислительном времени, поскольку позволяет быстро получить широкий спектр конфигураций и оценить, в какой мере более структурированные схемы и алгоритмы поиска улучшают целевые прокси-показатели K_1 и K_2 при сохранении допустимости. Пример визуализации схем размещения корпусов приведен на рис. 2.

Для сопоставления методов по целям исследования введены прокси-цели K_1 и K_2 . Коэффициент K_1 в исходной постановке трактуется как показатель эффективности использования площади застройки и определяется отношением суммы продаваемых площадей квартир и инвентаризационных площадей помещений, пригодных к аренде, к суммарной поэтажной площади здания в габаритах наружных стен. В рамках вычислительного эксперимента прямое воспроизведение K_1 невозможно из-за отсутствия данных о продаваемых и инвентаризационных площадях, поэтому используется прокси-цель K_1 , зависящая от показателей M_1 , M_3 , M_4 , M_5 , M_6 и штрафа нарушений M_9 (табл. 1). Коэффициент K_2 в исходной постановке трактуется как показатель эффективности использования земельного участка и определяется отношением площади участка к общей площади здания. В эксперименте применяется прокси-цель K_2 , вычисляемая как $K_2 = S_{\text{уч}}/M_2$, где $S_{\text{уч}}$ — площадь участка; M_2 — суммарная поэтажная площадь; значение K_2 минимизируется. Для исключения некорректных решений при $M_2 = 0$ значение K_2 считается недопустимым и принимается равным бесконечности.

Соблюдение ограничений фиксируется интегральным показателем M_9 «суммарный штраф нарушений ограничений», который агрегирует отклонения от набора проверяемых требований (геометрические отступы, допустимые разрывы между корпусами, до-



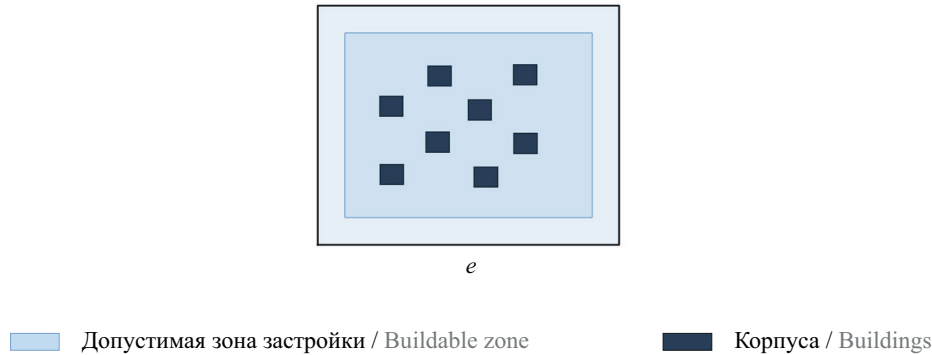


Рис. 2. Пример визуализации схем размещения корпусов (по восемь корпусов в каждом варианте): *a* — линейная застройка; *b* — линейная застройка вдоль границы; *c* — сеточная компоновка; *d* — периметральная застройка с формированием двора; *e* — случайная застройка; голубая область — допустимая зона застройки; темные прямоугольники — корпуса

Fig. 2. Examples of building placement schemes (eight buildings in each variant): *a* — linear layout; *b* — linear layout along the site boundary; *c* — grid layout; *d* — perimeter layout forming a courtyard; and *e* — random layout; the blue area indicates the permitted development zone, and the dark rectangles represent buildings

пустимость размещения в пределах участка и др.). Для каждого решения рассчитываются частные нарушения, после чего они суммируются в единый штраф: 0 означает полностью допустимое решение, рост штрафа отражают степень и число нарушений. Этот показатель используется как ограничивающий фактор при сравнении методов: решения с высоким штрафом считаются менее приемлемыми, даже если целевая метрика по K_1/K_2 формально лучше.

Методы формирования и выбора планировочных решений далее обозначаются буквенно-цифровыми индексами с семантически читаемыми префиксами: СЛ — случайная компоновка; МС — многостартовый отбор; ГА — генетический алгоритм; МО — отбор по модели машинного обучения. Индекс цели указывается как 1 или 2 для оптимизации соответственно K_1 или K_2 ; для сценарных оценок используются индексы S_1, S_2, S_3 .

Сценарии S_1, S_2, S_3 применяются как альтернативные наборы весов для интегральной девелоперской оценки решений, чтобы показать, как меняется предпочтение методов при разных приоритетах. S_1 соответствует сценарию «доход» и усиливает вклад показателей, связанных с полезной/коммерчески значимой площадью и плотностью. S_2 соответствует сценарию «инженерная часть/инфраструктура» и повышает вес факторов, отражающих стоимость и сложность инженерного обеспечения и пространственных разрывов. S_3 соответствует сценарию «комфорт» и сильнее учитывает параметры, связанные с качеством среды, — разреженность, комфортные разрывы, композиционную компактность. Эти сценарии применяются к одной и той же группе кандидатных планировок и позволяют сопоставлять методы в зависимости от целевых приоритетов. Во всех методах допустимость решения контролируется штрафом нарушений M_9 .

Метод СЛ (случайная компоновка). Планировочное решение формируется без фиксированного

шаблона: случайным образом задаются число корпусов, их габариты и положения в пределах допустимой зоны, после чего выполняется проверка ограничений. Для полученного решения вычисляются показатели M_1-M_9 и значения K_1, K_2 . Метод СЛ используется как базовая линия сравнения и как источник разнообразных решений при ограниченном вычислительном бюджете.

Методы МС(1) и МС(2) (многостартовый отбор по прокси-целям). В рамках заданного бюджета формируется набор решений методом СЛ, после чего выбирается одно решение по целевой прокси-цели. В МС(1) выбирается решение с максимальным K_1 ; в МС — решение с минимальным K_2 . При выборе учитываются допустимость по M_9 и правило $M_2 = 0 \rightarrow K_2 = INF$. Назначение многостартового отбора — уменьшение влияния случайности и повышение вероятности получения лучшего решения за счет увеличения числа попыток.

Методы ГА(1) и ГА(2) (генетический алгоритм по прокси-целям). Поиск выполняется методом эволюционной оптимизации: поддерживается множество решений, для которых вычисляются M_1-M_9 и целевые значения. Эволюционные подходы также целесообразно применять для генерации и оптимизации планировочных схем (в том числе с использованием пространственных разбиений), что подтверждается работами по автоматизированной генерации планировок [16]. Новые решения формируются операциями кроссовера и геометрических мутаций (смещение, масштабирование, разбиение, деформация), после чего выполняются процедуры восстановления допустимости и фильтрация по ограничениям. В ГА(1) оптимизируется K_1 , в ГА(2) — K_2 , при учете M_9 и правила $M_2 = 0 \rightarrow K_2 = INF$. Отбор решений осуществляется по принципу не доминирования (по Парето) для набора учитываемых критериев с выделением допустимых решений.

Методы $GA(S_1)$, $GA(S_2)$, $GA(S_3)$ (генетический алгоритм по сценарным оценкам). Эти варианты используют тот же механизм формирования новых решений и проверки ограничений, что и $GA(1)$, $GA(2)$, но в качестве целевых критериев применяются сценарные оценки S_1 , S_2 , S_3 соответственно. Полученные решения дополнительно характеризуются значениями K_1 и K_2 , что позволяет сопоставлять сценарно-ориентированный поиск с методами, оптимизирующими прокси-цели напрямую.

Методы $MO_{лин}(1)$, $MO_{лес}(1)$, $MO_{лин}(2)$, $MO_{лес}(2)$ (отбор по модели машинного обучения). Эти методы не формируют геометрию корпусов и применяются только для выбора одного решения из набора, сформированного методом СЛ [11, 12]. Для каждого решения вычисляются признаки на основе показателей M_1-M_9 и иных доступных характеристик планировки, после чего модель прогнозирует целевую величину. В $MO_{лин}(1)$ и $MO_{лес}(1)$ выбор выполняется по прогнозу K_1 (максимизация); в $MO_{лин}(2)$ и $MO_{лес}(2)$ — по прогнозу K_2 (минимизация).

Объект исследования: подготовка данных

Для решения поставленных задач была произведена подготовка исходных данных. На базе подготовленных комплектов проектной документации [18] выбраны размеры земельных участков и соответствующие им характеристики объектов строительства. В выборку включено 79 объектов. Числовые значения приводились к единому формату (с учетом запятых и пробелов в представлении чисел), после чего выполнялась проверка полноты ключевых полей, используемых далее в расчетах. На основании подготовленных сведений использованы значения коэффициентов K_1 и K_2 , а также характеристик объектов, необходимых для последующих этапов моделиро-

вания и сопоставления методов, описанных ранее. Пример обезличенного фрагмента исходных данных приведен в табл. 2.

Площадь земельного участка $S_{уч}$ не извлекалась из исходной таблицы, а задавалась в расчете относительно $S_{пятна}$ (площадь пятен застройки) по правилу:

$$S_{уч} = clamp\left(\frac{S_{пятна}}{0,20}; 1200; 16\ 000\right),$$

где $clamp(x, a, b)$ ограничивает значение x снизу величиной a и сверху величиной b .

Далее при моделировании участков сложной формы фактическая площадь полигона участка увеличивалась: для L-образной формы — в 1,35 раза, для U-образной формы — в 1,55 раза. В результате фактический диапазон площадей участков, использованных в эксперименте, составил приблизительно 1,985–19,383 м², т.е. около 1,98–19,38 тыс. м².

Для последующего применения методов MO в процедуре выбора планировочного решения выполнено отдельное обучение и проверка качества регрессионных моделей. Рассматривались три модели разного уровня сложности: DummyRegressor (прогноз среднего значения) как нижняя граница качества; линейная регрессия Ridge с предварительной стандартизацией признаков (StandardScaler) как базовый линейный вариант; RandomForestRegressor с параметрами ($n_estimators = 120$) и ($max_depth = 9$) как базовый нелинейный вариант [19, 20].

Корректность проверки обеспечивалась протоколом GroupKFold (5 разбиений) с группировкой по объектам: все варианты, относящиеся к одному объекту, целиком попадали либо в обучающую, либо в тестовую часть.

Качество оценивалось по метрикам R^2 , MAE и $RMSE$. Метрика R^2 характеризует долю объяснен-

Табл. 2. Обезличенный фрагмент исходных данных (ключевые показатели)

Table 2. Anonymized excerpt from the source dataset (key indicators)

Объект Object	K_1	K_2	Площадь застройки, м² Building footprint area, m²	Общая площадь, м² Total area, m²	Общая площадь квартир, м² Total apartment area, m²	Количество надземных этажей Number of above- ground floors
Объект № 1 Object No. 1	0,60	0,04	2694,00	64 616,00	36 488,00	33
Объект № 2 Object No. 2	0,54	0,09	5886,00	62 052,00	31 670,00	14
Объект № 3 Object No. 3	0,53	0,10	3660,28	36 131,80	17 242,30	14
Объект № 4 Object No. 4	0,73	0,29	1800,85	6164,00	4469,00	4
...	...	...	...	...	...	...
Объект № 77 Object No. 77	0,58	0,13	2608,00	20 010,00	11 251,00	16
Объект № 78 Object No. 78	0,62	0,14	1756,00	12 918,10	7679,70	18
Объект № 79 Object No. 79	0,55	0,19	4546,90	23 646,20	12 816,20	22

Табл. 3. Результаты валидации регрессионных моделей для целевых величин K_1 и K_2 (GroupKFold, 5 разбиений)
Table 3. Validation results for regression models predicting K_1 and K_2 (GroupKFold, 5 splits)

Модель Model	R^2 для K_1 R^2 for K_1	MAE для K_1 MAE for K_1	$RMSE$ для K_1 $RMSE$ for K_1	R^2 для K_2 R^2 for K_2	MAE для K_2 MAE for K_2	$RMSE$ для K_2 $RMSE$ for K_2
DummyRegressor	−0,017	0,069	0,079	−0,023	0,164	0,217
Ridge	0,751	0,030	0,039	0,899	0,044	0,068
Random Forest	0,995	0,0036	0,0053	0,999	0,00044	0,0043

ной дисперсии целевой величины (больше — лучше). MAE определяет среднюю абсолютную ошибку прогноза. $RMSE$ является корнем из среднеквадратичной ошибки и более чувствительна к редким крупным отклонениям. Результаты валидации регрессионных моделей для целевых величин K_1 и K_2 приведены в табл. 3.

По совокупности метрик $R^2/MAE/RMSE$ наилучшее качество для обеих целевых величин показал Random Forest; данная модель принята как основная в процедуре выбора вариантов по K_1 и K_2 . Ridge сохранена в качестве линейного ориентира для интерпретации и проверки устойчивости выводов. DummyRegressor использовался только как нулевая линия сравнения на этапе валидации.

В контексте настоящего исследования, помимо базовой задачи генерации планировочного решения,

ставилась задача оптимизации посредством управления коэффициентами эффективности K_1 и K_2 — что, по сути, создавало имитационную модель управления показателями ИСП на ранних этапах жизненного цикла (ЖЦ) объекта, в частности при выборе и оценке будущего участка строительства со стороны девелопера.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент выполнен на 79 объектах с использованием расширенного набора из 18 методов генерации и селекции планировок планировочного решения. Сопоставление проводилось по двум целям: максимизация прокси-цели K_1 и минимизация прокси-цели K_2 . Сводные результаты сопоставления методов по целям представлены в табл. 4.

Табл. 4. Сводные результаты сравнения методов по целям K_1 и K_2
Table 4. Summary comparison of methods for the K_1 and K_2 targets

Метод Method	K_1 (средний) K_1 (mean)	K_1 против линейной застройки K_1 vs linear development	Доля лучше (линейная застройка), % Share better than linear development, %	Доля допустимых, % Acceptable share, %	K_2 (средний) K_2 (mean)	K_2 против линейной застройки K_2 vs linear development
МС(1) / Random MS(1)	0,6206	0,0705	91,1	100,0	1,0702	0,7758
МО _{лес} (1) / RF(1)	0,6190	0,0689	89,9	100,0	1,0800	0,7709
ГА(1) / GA(1)	0,6164	0,0663	89,9	98,7	1,1007	0,7413
МО _{лин} (6) / Ridge(1)	0,5922	0,0422	77,2	97,5	1,3788	0,4531
Ансамбль эвристик по K_1 Heuristics ensemble for K_1	0,5888	0,0387	63,3	97,5	1,3099	0,2490
ГА(S_3) / GA (comfort)	0,5743	0,0242	58,2	98,7	1,6532	0,1650
ГА(S_2) / GA (infra)	0,5671	0,0170	65,8	98,7	1,1554	0,6478
ГА(S_1) / GA (revenue)	0,5506	0,0005	51,9	98,7	0,7743	1,0739
Линейная застройка Linear layout	0,5501	0,0000	0,0	75,9	1,8457	0,0000
Периметральная застройка с формированием двора Perimeter layout with courtyard	0,5500	−0,0001	21,5	100,0	nan	nan
ГА(2) / GA (2)	0,5420	−0,0081	45,6	98,7	0,7547	1,0967

Метод Method	K_1 (средний) K_1 (mean)	K_1 против линейной застройки K_1 vs linear development	Доля лучше (линейная застройка), % Share better than linear development, %	Доля допустимых, % Acceptable share, %	K_2 (средний) K_2 (mean)	K_2 против линейной застройки K_2 vs linear development
Линейная застройка вдоль кромки Edge-aligned linear layout	0,5269	−0,0232	29,1	55,7	1,4984	0,1379
Случайная застройка Random layout	0,5186	−0,0315	38,0	65,8	0,8648	0,9614
Сеточная застройка Grid layout	0,5131	−0,0370	21,5	62,0	0,8550	1,0191
Ансамбль эвристик по K_2 Heuristics ensemble for K_2	0,4917	−0,0584	22,8	57,0	0,7441	1,1318
МС(2) / Random MS (2)	0,4238	−0,1263	6,3	39,2	0,5884	1,2689
МО _{лес} (2) / RF(2)	0,4230	−0,1271	6,3	38,0	0,5884	1,2689
МО _{лин} (2) / Ridge(2)	0,4215	−0,1286	6,3	36,7	0,5885	1,2687

На рис. 3 приведено ранжирование методов по среднему значению K_1 . По результатам видно, что наибольшие средние значения K_1 достигаются методами многостартового выбора по K_1 и методами выбора на основе модели МО, а эволюционная оптимизация по K_1 занимает сопоставимую позицию и устойчиво входит в группу лидеров. Это указывает на то, что при цели повышения K_1 решающее значение имеет способность метода при фиксированном бюджете расчета сформировать широкий набор вариантов и выбрать среди них решения, близкие к целевым плотностным характеристикам при соблюдении ограничений.

Сводные результаты по средним значениям показывают, что наилучшие значения K_1 получены для методов МС(1), МО_{лес}(1) и ГА(1). Для цели минимизации K_2 наименьшие средние значения демонстрируют методы МС(2), МО_{лес}(2) и МО_{лин}(2). Распределение «побед» по объектам (рис. 4) подтверждает различие поведения методов по целям: для K_1 преимущество сосредоточено между МС(1) и ГА(1), тогда как для K_2 доминирование МС(2) выражено существенно сильнее. Это означает, что при принятой формуле K_2 и заданном вычислительном бюджете экстремально малые значения K_2 чаще достигаются усилением процедуры выбора лучшего варианта в многостартовом режиме.

Отдельно оценивалась инженерная сторона результата — доля допустимых решений. Выявлен устойчивый компромисс между достижением экстремального значения целевой величины и соблюдением ограничений. Для K_2 метод МС(2) обеспечивает наилучший средний результат по целевой величине, однако доля допустимых решений составляет около 39 %. Для ГА(2) наблюдается обратная ситуация: среднее значение K_2 хуже, но доля допустимых решений близка к полной (около 99 %). Для сценариев максимизации K_1 столь выраженного падения допустимости не наблюдается: методы МС(1) и МО_{лес}(1) обеспечивают высокие значения K_1 при высокой или полной доле допустимых решений. Распределение выигрыша по K_2 по объектам приведено на рис. 5.

Результаты по типам формы участков (прямоугольные, L-образные, U-образные) демонстрируют согласованную картину: по K_1 на прямоугольных и U-образных участках чаще лидирует МС(1), тогда как на L-образных заметнее преимущество ГА(1). По K_2 в большинстве случаев лидируют МС(2) и методы выбора на основе моделей машинного обучения, использующие тот же порядок формирования множества вариантов; при переходе к режиму строгого контроля допустимости предпочтение смещается к ГА(2).

Приведем итоговую схему применения по результатам эксперимента. Для задач, ориентированных на максимизацию K_1 , основным методом при-

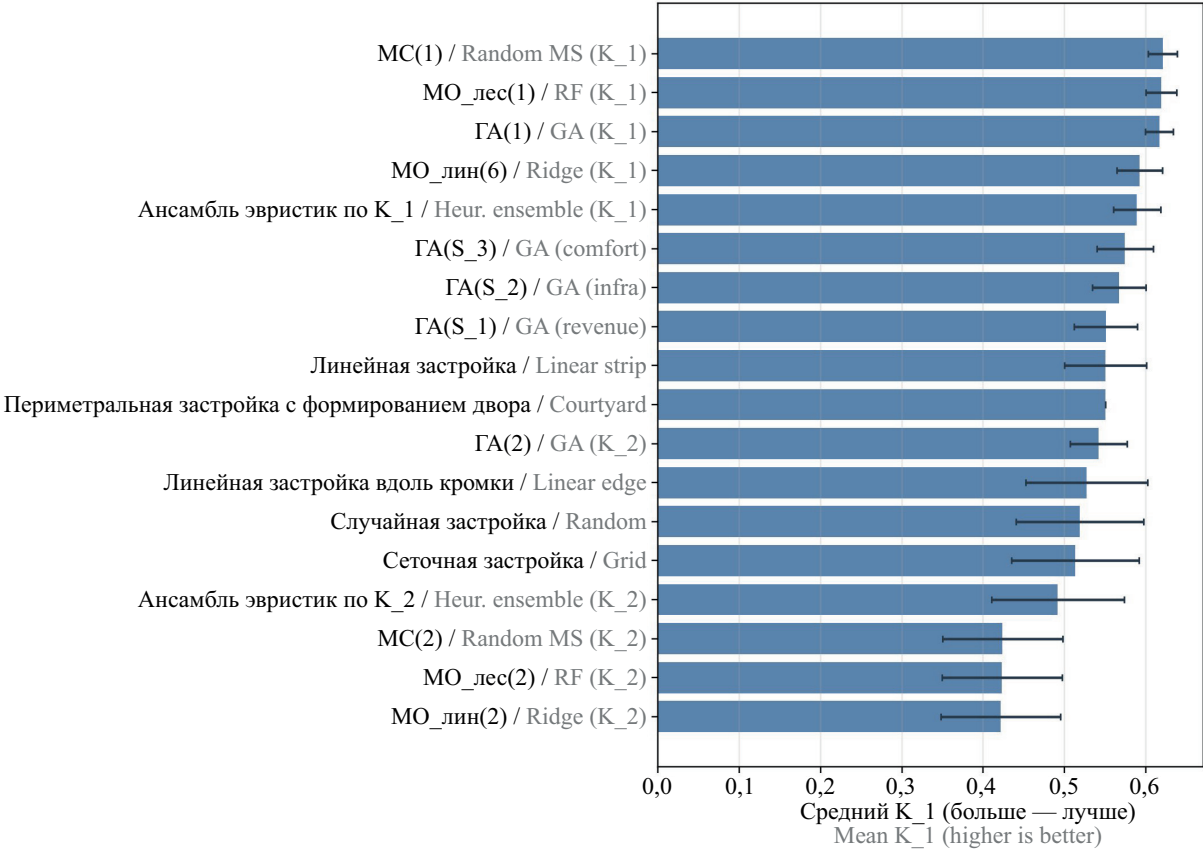


Рис. 3. Ранжирование методов по среднему значению K_1
Fig. 3. Ranking of methods by the mean K_1 value

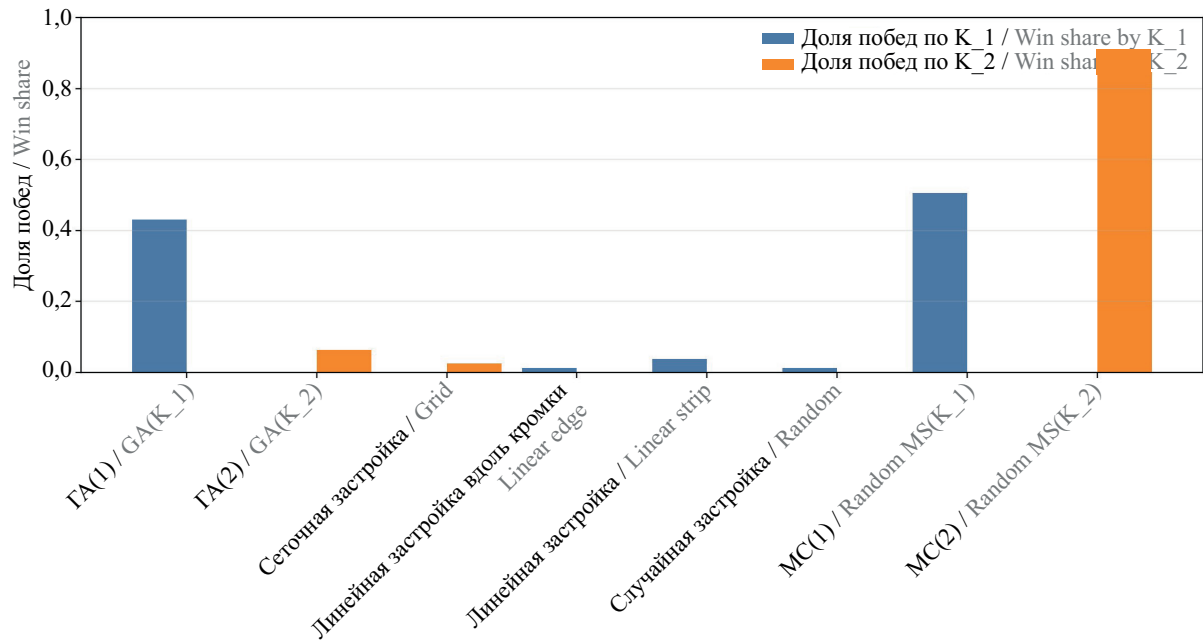


Рис. 4. Доля побед методов по целям K_1 и K_2
Fig. 4. Win share of methods for the K_1 and K_2 objectives

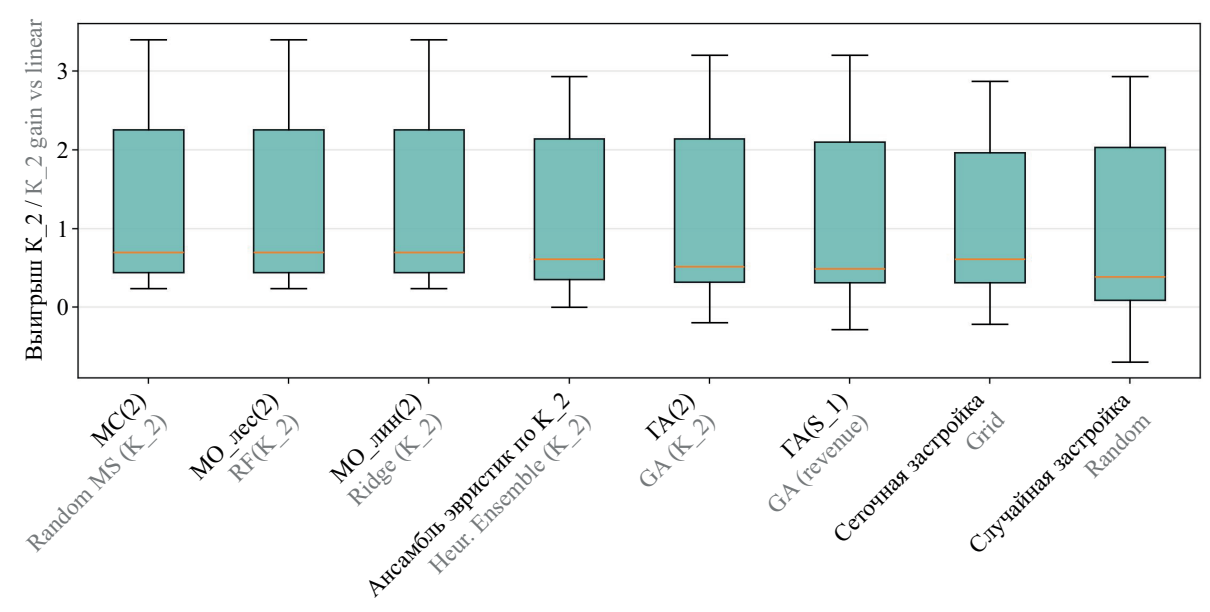


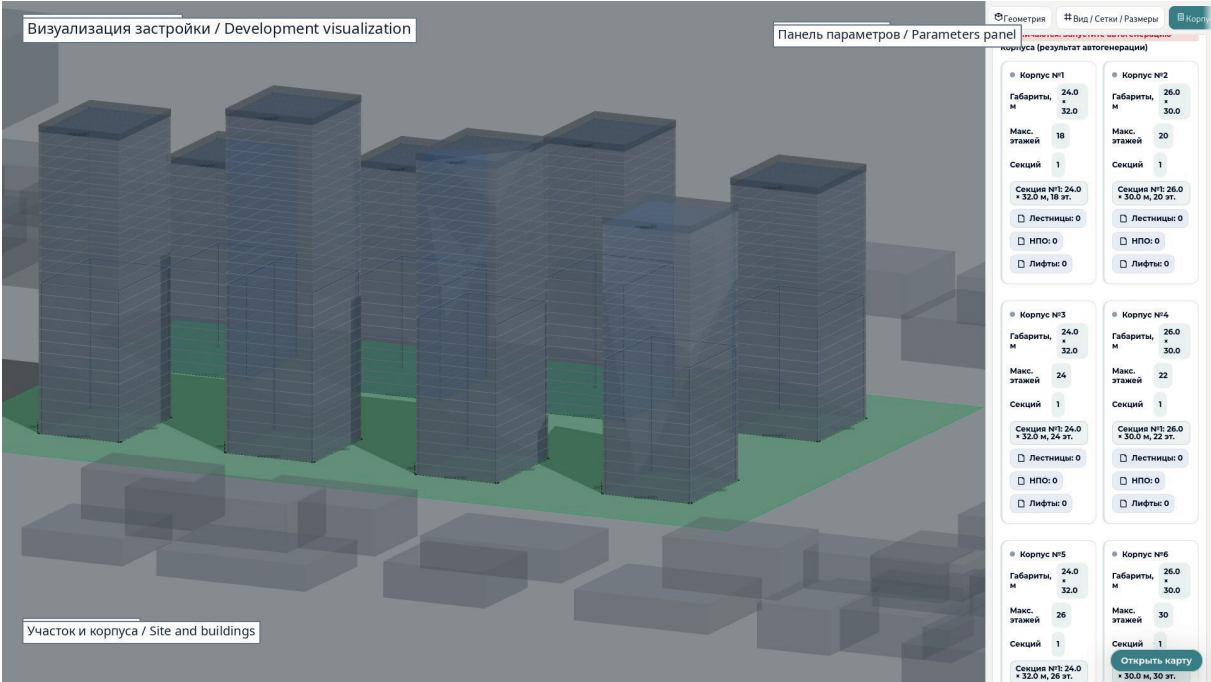
Рис. 5. Распределение выигрыша по K_2 по объектам
Fig. 5. Distribution of K_2 gains across objects

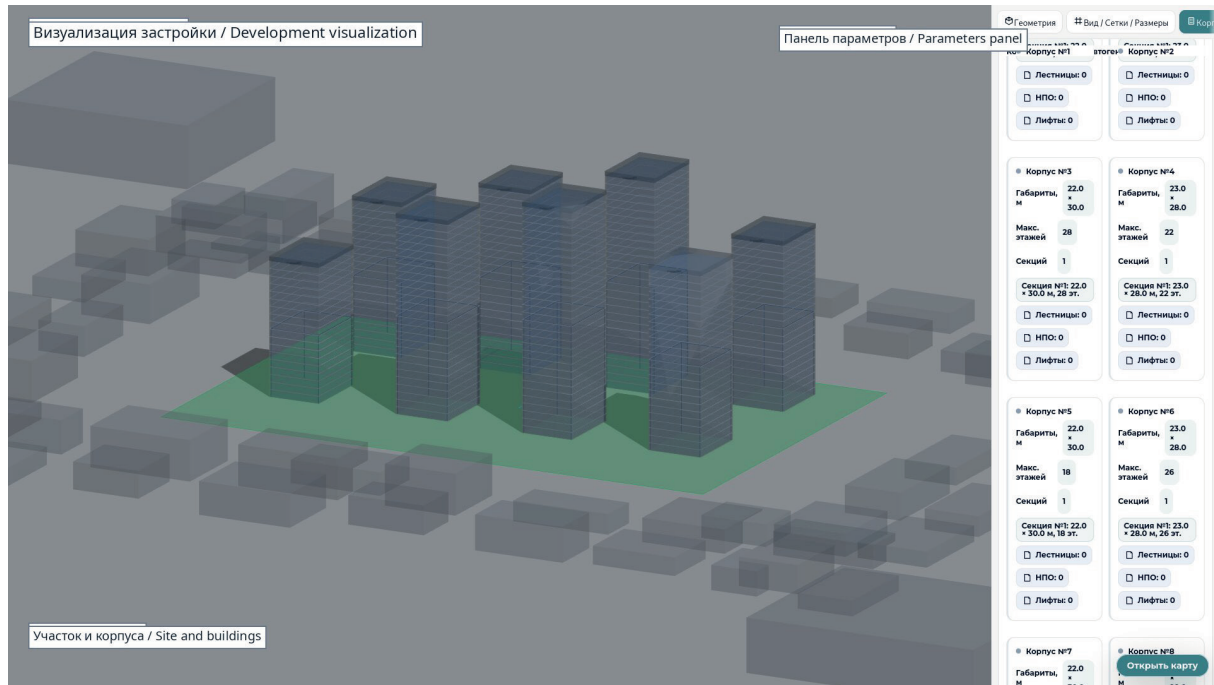
нят MC(1), а ГА(1) рассматривается как устойчивый альтернативный вариант. Для задач минимизации K_2 при приоритете реализуемости и жестком контроле ограничений предпочтителен ГА(2). Модели МО применяются только как средство выбора лучшего варианта из сформированного множества и не используются для построения геометрии корпусов.

Практический вывод здесь следующий: методы, которые оптимизируют только целевой коэффициент через жесткую селекцию, могут давать сильный результат по метрике, но менее устойчивы по соблю-

дению ограничений; эволюционный поиск в этом смысле ведет себя стабильнее и ближе к «инженерному» режиму, где важен не только экстремум, но и реализуемость.

Для интерпретации и демонстрации полученных решений использована отдельная визуализационная среда, воспроизводящая компоновку корпусов в 3D-сцене с отображением участка и контекстного окружения. В интерфейсе предусмотрена панель управления параметрами (геометрия, вид, параметры генерации) с целью быстрого переключения между





b

Рис. 6. Интерфейс визуализации и настройки параметров: *a* — в режиме K_1 3D-сцена с участком и окружением, панель управления параметрами компоновки; *b* — в режиме K_2 3D-сцена с участком и окружением, панель управления параметрами компоновки

Fig. 6. Visualization and parameter-tuning interface: *a* — K_1 mode, showing a 3D scene with the site and its surroundings and a control panel for layout parameters; *b* — K_2 mode, showing a 3D scene with the site and its surroundings and a control panel for layout parameters

режимами оптимизации по K_1 и K_2 и получать сопоставимые визуальные представления. Интерфейс визуализации показан на рис. 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализируя результаты проведенного исследования, авторы пришли к выводу о применимости моделей ИИ для создания массинг-моделей, привязанных к земельным участкам, для ИСП многоквартирных жилых зданий. При этом первично развернутый для этого программный комплекс показал высокую эффективность и скорость обработки данных, что в комбинации с соответствующими вычислительными ресурсами позволяет фактически управлять показателями ИСП многоквартирных жилых зданий в режиме реального времени, что существенно сокращает трудозатраты для этой части проектирования и при этом в значительной степени его автоматизирует.

Вместе с тем необходимо отметить, что исследование проведено в определенном типе/конфигурации объемного планировочного решения жилых зданий и не учитывает такие особенности, как наличие и конструктивные особенности подземной и стилобатной частей здания, инсоляцию и другие технические характеристики.

В рамках настоящей работы акцент сделан на воспроизводимой вычислительной постановке и сравнении моделей, используемых для оценки и ранжирования вариантов по прокси-показателям, без генеративного синтеза геометрии. Однако генеративные подходы (GAN-семейство, VAE, диффузионные модели, трансформеры) рассматриваются как перспективное направление дальнейшего развития исследования.

Основываясь на полученных результатах, предполагается несколько ключевых направлений для дальнейших исследований в данной области:

1. Расширение исходных данных по объекту строительства.

Для создания более сложных и многофакторных моделей ИИ целесообразно провести исследования с добавлением такой значимой информации, как нормы инсоляции, объемно-планировочные решения подземной и стилобатных частей здания, фасадные решения. Интеграция этих сведений может способствовать разработке более надежных прогностических моделей с более высокими диапазонами точности.

2. Рассмотрение других значимых элементов моделирования земельного участка.

В процессе рассмотрения задач исследования такие показатели, как внутриплощадочные сети, улично-дорожная сеть в пределах участка, расположение вспомогательных сооружений и малых архитектурных

форм не были учтены. Представляется перспективным включение этих показателей для создания моделей ИИ.

3. Развитие генеративного проектирования и расширение пространства решений. В дополнение к использованной в работе постановке, основанной на оценке и ранжировании вариантов по прокси-показателям, перспективным направлением дальнейших исследований является применение современных генеративных подходов для автоматизированного синтеза альтернативных планировочных решений и последующей оптимизации по совокупности критериев.

Исследование содержит описание и анализ существующих моделей ИИ. Показано, что методы, ориентированные на получение большого числа альтернатив и последующий отбор лучшего варианта (включая многостартовый отбор и выбор с применением регрессионных моделей), обеспечивают высокие значения целевых показателей при фиксированном вычислительном бюджете.

Для формализованного сравнения использованы прокси-цели K_1 (максимизация) и K_2 (минимизация),

обеспечивающие сопоставимость методов при ограниченности исходных сведений для прямого вычисления исходных коэффициентов.

Выявлен устойчивый компромисс между улучшением целевой метрики и соблюдением ограничений: в ряде режимов жесткая селекция по целевому показателю сопровождается снижением доли допустимых решений, тогда как эволюционный поиск демонстрирует более стабильное соблюдение ограничений.

Установлено, что регрессионные модели применимы как инструмент ранжирования и выбора вариантов при корректной проверке качества с разбиением по объектам (GroupKFold), что снижает риск утечки информации и соответствует задаче обобщения на новые объекты.

Реализован программный комплекс, включающий генерацию вариантов планировочных решений, расчет показателей качества и допустимости, а также сопоставление методов по единым правилам оценивания, позволяющий решать задачи управления показателями ИСП на ранних этапах ЖЦ объекта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шумов В.Н. Трансформация строительных технологий под влиянием ИИ // Символ науки: международный научный журнал. 2024. Т. 1. № 12–2. С. 87–98. EDN STOEYQ.
2. Лентюхова О.Ю. Оптимизация межевания жилых элементов планировочной структуры (расчетно-графический этап) // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2024. № 3 (47). С. 13–21. DOI: 10.22227/2311-1518.2024.3.13-21. EDN GTGTCD.
3. Манин П.А., Епифанцева Л.Р. Роботизированное проектирование в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2025. № 4. С. 68–72. DOI: 10.33622/0869-7019.2025.04.68-72. EDN GCKMFS.
4. Киевский И.Л., Семенов С.А., Крутяков А.Ю., Гришутин И.Б., Максимов С.О., Каргаишин М.Е. и др. Искусственный интеллект в градостроительной деятельности: современные методы и их перспективы // Промышленное и гражданское строительство. 2025. № 8. С. 77–82. DOI: 10.33622/0869-7019.2025.08.77-82. EDN GPNWYL.
5. Mirza M., Osindero S. Conditional Generative Adversarial Nets // arXiv. 2014. DOI: 10.48550/arXiv.1411.1784
6. Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S. et al. Generative Adversarial Nets // Advances in Neural Information Processing Systems. 2014. Vol. 27.
7. Kingma D.P., Welling M. Auto-Encoding Variational Bayes // arXiv. 2013. DOI: 10.48550/arXiv.1312.6114
8. Ho J., Jain A., Abbeel P. Denoising Diffusion Probabilistic Models // arXiv. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2006.11239
9. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N. et al. Attention Is All You Need // arXiv. 2017.
10. Адонина А.В., Денисова М.Н. Архитектурно-градостроительная деятельность и искусственный интеллект // Innovative Project. 2024. Т. 9. № 15. С. 78–82. DOI: 10.17673/IP.2024.9.15.10. EDN SROKHY.
11. Zhong C., Shi Y., Cheung L.H., Wang L. AI-Enhanced Performative Building Design Optimization and Exploration // CAADRIA Proceedings. 2024. Vol. 1. Pp. 59–68. DOI: 10.52842/conf.caadria.2024.1.059
12. Rahbar M., Mahdavejrad M., Markazi A.H.D., Bermanian M. Architectural Layout Design through Deep Learning and Agent-Based Modeling: A Hybrid Approach // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 47. P. 103822. DOI: 10.1016/j.jobee.2021.103822. EDN VIVSDE.
13. Deb K., Jain H. An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2014. Vol. 18. Issue 4. Pp. 577–601. DOI: 10.1109/tevc.2013.2281535
14. Todinov M. Reliability and Risk Models: Setting Reliability Requirements. 2nd ed. Wiley, 2015. 406 p. DOI: 10.1002/9781118873199
15. Rhee J., Veloso P. A Physics-Based Constraint Solver for the Site Layout Optimization of Non-convex Buildings with Multiple Requirements // Communications

in Computer and Information Science. 2023. Pp. 594–606. DOI: 10.1007/978-3-031-37189-9_39

16. Knecht K., König R. Generating Floor Plan Layouts with K-d Trees and Evolutionary Algorithms // GA2010 — 13th Generative Art Conference. 2010. Pp. 238–253.

17. Klar M., Langlotz P., Aurich J.C. A Framework for Automated Multiobjective Factory Layout Planning Using Reinforcement Learning // Procedia CIRP. 2022. Vol. 112. Pp. 555–560. DOI: 10.1016/j.procir.2022.09.099. EDN CNDQKA.

18. Гуреев М.В., Макаров А.Н. Модель прогнозирования материальных ресурсов и сметной стоимости на ранних этапах жизненного цикла объектов строительства // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 11.

C. 1835–1849. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1835-1849. EDN ZCNAQS.

19. Lathong K., Wisaeng K. An innovative hybrid machine learning techniques for predicting construction cost estimates // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2024. Vol. 20. Issue 3. Pp. 69–83. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-3-69-83. EDN KIPHPW.

20. Nindartin A., Park S.Ju., Lee K.T., Kim Ju.H., Rostiyanti S.F. Prediction of cost contingency in construction projects by introducing machine learning algorithms // Journal of Civil Engineering and Management. 2025. Vol. 31. Issue 8. Pp. 860–880. DOI: 10.3846/jcem.2025.24913. EDN OTWXUA.

Поступила в редакцию 17 февраля 2026 г.

Принята в доработанном виде 6 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 6 марта 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Михаил Владимирович Гуреев** — аспирант кафедры технологий и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0009-0002-3069-7614; mvgureev@gmail.com;

Вадим Игоревич Волощук — магистрант, кафедра вычислительной техники, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности; **Южный федеральный университет (ЮФУ)**; 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, д. 105/42; ORCID: 0009-0003-0336-9305; vvoloshchuk@sfedu.ru.

Вклад авторов:

Гуреев М.В. — концепция исследования, постановка цели и задач исследования, обзор предметной области и разработка методологии, написание и редактирование текста, анализ полученных результатов исследования и итоговые выводы.

Волощук В.И. — разработка программной реализации, проведение вычислительных экспериментов, обработка результатов, подготовка иллюстративных материалов и участие в оформлении рукописи, написание и редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Shumov V.N. Transformation of construction technologies under the influence of AI. *Symbol of Science: International Scientific Journal*. 2024; 1(12-2):87-98. EDN STOEYQ. (rus.).

2. Leptyukhova O.Yu. Optimisation of residential elements of the planning structure (calculation and graphic stage). *Biosphere Compatibility: Human, Region, Technologies*. 2024; 3(47):13-21. DOI: 10.22227/2311-1518.2024.3.13-21. EDN GTGTCD. (rus.).

3. Manin P.A., Epifantseva L.R. Robotic design in construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2025; 4:68-72. DOI: 10.33622/0869-7019.2025.04.68-72. EDN GCKMFS. (rus.).

4. Kievskiy I.L., Semenov S.A., Krutyakov A.Y., Grishutin I.B., Maksimov S.O., Kargashin M.E. et al. Artificial intelligence in urban planning: modern methods and their prospects. *Industrial and Civil Engineering*. 2025; 8:77-82. DOI: 10.33622/0869-7019.2025.08.77-82. EDN GPNWYL. (rus.).

5. Mirza M., Osindero S. Conditional Generative Adversarial Nets. *arXiv*. 2014. DOI: 10.48550/arXiv.1411.1784

6. Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S. et al. Generative Adversarial Nets. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2014; 27.

7. Kingma D.P., Welling M. Auto-Encoding Variational Bayes. *arXiv*. 2013. DOI: 10.48550/arXiv.1312.6114

8. Ho J., Jain A., Abbeel P. Denoising Diffusion Probabilistic Models. *arXiv*. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2006.11239

9. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N. et al. *Attention Is All You Need*. arXiv. 2017.

10. Adonina A., Denisova M. Architectural and urban planning activity and artificial intelligence. *Innovative Project*. 2024; 9(15):78-82. DOI: 10.17673/IP.2024.9.15.10. EDN SROKHY. (rus.).

11. Zhong C., Shi Y., Cheung L.H., Wang L. AI-Enhanced Performative Building Design Optimization and Exploration. *CAADRIA Proceedings*. 2024; 1:59-68. DOI: 10.52842/conf.caadria.2024.1.059
12. Rahbar M., Mahdaveinejad M., Markazi A.H.D., Bermanian M. Architectural Layout Design through Deep Learning and Agent-Based Modeling: A Hybrid Approach. *Journal of Building Engineering*. 2022; 47:103822. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103822. EDN VIVSDE.
13. Deb K., Jain H. An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2014; 18(4):577-601. DOI: 10.1109/tevc.2013.2281535
14. Todinov M. *Reliability and Risk Models: Setting Reliability Requirements*. 2nd ed. Wiley, 2015; 406. DOI: 10.1002/9781118873199
15. Rhee J., Veloso P. A Physics-Based Constraint Solver for the Site Layout Optimization of Non-convex Buildings with Multiple Requirements. *Communications in Computer and Information Science*. 2023; 594-606. DOI: 10.1007/978-3-031-37189-9_39
16. Knecht K., König R. Generating Floor Plan Layouts with K-d Trees and Evolutionary Algorithms. *GA2010 — 13th Generative Art Conference*. 2010; 238-253.
17. Klar M., Langlotz P., Aurich J.C. A Framework for Automated Multiobjective Factory Layout Planning Using Reinforcement Learning. *Procedia CIRP*. 2022; 112:555-560. DOI: 10.1016/j.procir.2022.09.099. EDN CNDQKA.
18. Gureev M.V., Makarov A.N. Model of forecasting of material resources and estimated cost at early stages of life cycle of construction objects. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(11):1835-1849. DOI: 10.22227/1997-0935. 2024.11.1835-1849. EDN ZCNAQS. (rus.).
19. Lathong K., Wisaeng K. An innovative hybrid machine learning techniques for predicting construction cost estimates. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024; 20(3):69-83. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-3-69-83. EDN KIPHPW.
20. Nindartin A., Park S.Ju., Lee K.T., Kim Ju.H., Rostiyanti S.F. Prediction of cost contingency in construction projects by introducing machine learning algorithms. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2025; 31(8):860-880. DOI: 10.3846/jcem.2025.24913. EDN OTWXUA.

Received February 17, 2026.

Adopted in revised form on March 6, 2026.

Approved for publication on March 6, 2026.

B I O N O T E S : **Mikhail V. Gureev** — postgraduate student of the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0002-3069-7614; mvgureev@gmail.com;

Vadim I. Voloshchuk — master's student, Department of Computer Engineering, Institute of Computer Technologies and Information Security; **Southern Federal University (SFedU)**; 105/42 Bolshaya Sadovaya st., Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation; ORCID: 0009-0003-0336-9305; vvoloshchuk@sfsu.ru.

Contribution of the authors:

Mikhail V. Gureev — research concept, setting the goal and objectives of the study, review of the subject area and development of the methodology, writing and editing the text, analysis of the research results and final conclusions.

Vadim I. Voloshchuk — development of software implementation, conducting computational experiments, processing the results, preparation of illustrative materials and participation in the design of the manuscript, writing and editing the text.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 005.334:711.7

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.1041-1068

Разработка подхода к интегральной оценке рисков проектов формирования парковочных пространств в мегаполисе

Наталья Григорьевна Верстина, Наталья Николаевна Щепкина,
Владимир Сергеевич Цура

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Высокие темпы автомобилизации в мегаполисах в сочетании с постоянным дефицитом парковочных пространств обуславливают необходимость реализации крупномасштабных проектов в сфере парковочной инфраструктуры. Реализация таких проектов сопряжена с существенными нормативно-правовыми, инвестиционными и градостроительными рисками, что требует совершенствования подходов к их оценке. Ввиду того, что указанные виды рисков взаимосвязаны и оказывают совокупное воздействие на конечные результаты проектов, возникает потребность в интегральной оценке рисков, позволяющей учитывать их во взаимодействии. Цель исследования — разработка подхода к интегральной оценке рисков проектов формирования парковочных пространств в мегаполисе.

Материалы и методы. Материалами исследования послужили данные международной и российской практики, нормативно-техническая документация, научная литература. Применены методы систематизации, анализа, декомпозиции, сравнительного анализа, целевого анализа и матричного анализа. С использованием данных методов разработана классификация рисков, определены этапы жизненного цикла (ЖЦ), целевые параметры и матрица рисков.

Результаты. Разработан четырехэтапный интегральный подход к количественной оценке рисков проектов формирования парковочных пространств в мегаполисе. Предложенный подход включает: стандартизацию и стратегическое взвешивание исходных экспертных оценок влияния рисков на целевые параметры проекта; расчет интегрального показателя риска на основе вероятности наступления риска, стратегически взвешенного влияния и управляемости; агрегацию рисков по этапам ЖЦ с формированием сводных показателей этапов и итогового риска проекта; группировку рисков по целевым параметрам проекта с расчетом интегральных показателей риска по каждому параметру. Отличительная особенность подхода состоит в одновременном учете двух взаимодополняющих измерений агрегации рисков — по этапам ЖЦ и целевым параметрам проекта, что позволяет дифференцировать тактический и стратегический уровни управления.

Выводы. Разработанный подход дает возможность количественно оценивать риски, обеспечивая агрегацию рисков по этапам ЖЦ и целевым параметрам. В отличие от дискретного анализа отдельных рисков, подход формирует систему показателей для тактического распределения ресурсов и стратегического определения приоритетов. Результаты могут быть использованы для обоснования управленческих решений и внедрены в практику управления проектами формирования парковочных пространств в мегаполисах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: управление рисками, интегральная оценка рисков, проекты формирования парковочных пространств, мегаполис, жизненный цикл проекта, целевые параметры проекта, тактическое управление, стратегическое управление, количественные показатели риска

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Верстина Н.Г., Щепкина Н.Н., Цура В.С. Разработка подхода к интегральной оценке рисков проектов формирования парковочных пространств в мегаполисе // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 6. С. 1041–1068. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.1041-1068

Автор, ответственный за переписку: Наталья Николаевна Щепкина, schepkinann@mgsu.ru.

An integrated risk assessment approach for parking space development projects in a megacity

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

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

ABSTRACT

Introduction. High rates of motorization in megacities, combined with a persistent shortage of parking spaces, necessitate the implementation of large-scale parking infrastructure projects. Such projects entail significant regulatory, investment, and urban planning risks, which require improved assessment approaches. Since these risks are interrelated and may have a cumulative effect on project outcomes, an integrated risk assessment approach is needed. The objective of this study is to develop an approach to the integrated risk assessment of parking space development projects in megacities.

Materials and methods. The study draws on international and Russian practical experience, regulatory and technical documentation, as well as scientific literature. The methods applied include systematization, analysis, decomposition, comparative analysis, target analysis, and matrix analysis. A risk classification pattern was developed, life-cycle stages and target parameters were identified, and a risk matrix was constructed.

Results. The study resulted in the development of a four-stage integrated approach for the quantitative assessment of risks associated with parking space development projects in megacities. The proposed approach includes standardization and strategic weighting of initial expert assessments of the impact of risks using project target parameters; calculation of an integrated risk indicator based on the probability of risk occurrence, strategically weighted impact and manageability; aggregation of risks by life-cycle stages, yielding summary indicators for each stage and an overall project risk indicator; and grouping of risks by project target parameters, with integrated risk indicators calculated for each parameter. A distinctive feature of the proposed approach is the simultaneous consideration of two complementary dimensions of risk aggregation — by life-cycle stages and by project target parameters — which makes it possible to distinguish between tactical and strategic levels of management.

Conclusions. The developed approach enables quantitative risk assessment, enabling risk aggregation by lifecycle stages and target parameters. Unlike discrete analysis of individual risks, this approach generates a system of indicators for tactical resource allocation and strategic prioritization. The results can be used to substantiate management decisions and implemented in the practice of managing parking space development projects in megacities.

KEYWORDS: risk management, integrated risk assessment, parking space development projects, megacity, project life cycle, target project parameters, tactical management, strategic management, quantitative risk indicators

FOR CITATION: Verstina N.G., Shchepkina N.N., Tsura V.S. An integrated risk assessment approach for parking space development projects in a megacity. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(6): 1041-1068. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.1041-1068 (rus.).

Corresponding author: Natalia N. Shchepkina, schepkinann@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Дефицит парковочных пространств в крупнейших мегаполисах мира приобрел характер системной проблемы, оказывающей непосредственное влияние на транспортную доступность, экологическую безопасность и качество городской среды. Согласно прогнозам Международного транспортного форума¹ (ITF, 2025) в ближайшее десятилетие продолжится стремительный рост количества автотранспортных средств, что обуславливает необходимость ускоренного развития парковочного пространства. Данная проблема характерна и для российских городов. В российских мегаполисах темпы автомобилизации устойчиво опережают развитие парковочной инфраструктуры, что приводит к перегрузке улично-дорожной сети, хаотичному хранению транспортных средств и снижению эффективности использования городских территорий [1, 2].

Устойчивый рост мирового рынка парковочных пространств подтверждается общемировыми тенденциями развития парковочной инфраструктуры. Так, согласно исследованиям Mordor Intelligence², объем мирового рынка парковочных пространств в 2025 г. оценивался в 5,67 млрд долл. США, в 2026 г. — в 6,19 млрд долл. США. По прогнозам, к 2031 г. рынок достигнет 9,58 млрд долл. США при среднегодовом темпе роста 9,18 % в период с 2026 по 2031 г.

По данным Market Research Intellect³, сегмент автоматических парковочных систем демонстрирует положительную динамику. В 2024 г. его объем оценивался в 3,5 млрд долл. США, а к 2033 г. по прогнозам достигнет 8,6 млрд долл. США при среднегодовом темпе роста 10,5 % в период с 2024 по 2033 г. Сегмент технологий интеллектуальной парковки в 2024 г. составил 4,5 млрд долл. США, и по прогнозам к 2033 г. он достигнет 12,1 млрд долл. США при среднегодовом темпе роста 12,5 % в период с 2026 по 2033 г. Сегмент многоэтажных парковочных пространств, по оценкам Verified Market Reports⁴, составил 2,94 млрд долл. США в 2024 г. и по прогнозам достигнет 5,10 млрд долл. США к 2033 г., что соответствует среднегодовому темпу роста 7,0 % в период с 2026 по 2033 г. Динамика объемов рассматриваемых сегментов, а также прогнозные значения среднегодовых темпов роста систематизированы в табл. 1.

Представленная информация показывает дифференциацию темпов роста различных сегментов рынка парковочных пространств. Наиболее динамичное развитие отмечается в сегменте технологий интеллектуальной парковки (среднегодовой темп роста 12,5 %), наименее интенсивный рост характерен для сегмента многоэтажных парковочных пространств (среднегодовой темп роста 7,0 %), промежуточное значение занимает сегмент автоматиче-

¹ International Transport Forum. 2025. Paris : OECD Publishing, 2025. URL: <https://www.itf-oecd.org/itf-transport-outlook-2025> DOI: 10.1787/9789264425678-en

² Parking Management Market Size & Share Analysis — Growth Trends and Forecast (2026–2031). URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/parking-management-market>

³ Глобальные автоматические парковочные системы APS. Исследование рынка — конкурентный ландшафт, анализ сегмента и прогноз роста. URL: <https://www.marketresearchintellect.com/ru/product/global-automatic-parking-systems-aps-market-size-and-forecast/>

⁴ Global Multi-storey Parking Lot Market Size by Type of Parking Structure. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/ru/product/multi-storey-parking-lot-market/>

Табл. 1. Объемы и прогнозные показатели рынков парковочных пространств и их сегментов на период до 2033 г.
Table 1. Market size values and forecast indicators of parking space markets and their segments for the period up to 2033

Рынок/сегмент Market/segment	Объем в 2024 г., млрд долл. США 2024 market size, USD billion	Объем в 2025 г., млрд долл. США 2025 market size, USD billion	Объем в 2026 г., млрд долл. США 2026 market size, USD billion	Прогноз на 2031– 2033 гг., млрд долл. США Forecast for 2031–2033, USD billion	Годовой темп прироста, % Annual growth rate, %
Мировой рынок парковочных пространств (общий) Global parking space market (overall)	–	5,67	6,19	9,58 (2031)	9,18 (2026–2031)
В том числе сегменты Including segments					
Сегмент автоматических парковочных систем Automatic parking systems	3,5	–	–	8,6 (2033)	10,5 (2026–2032)
Сегмент технологий интеллектуальной парковки Smart parking technologies	4,5	–	–	12,1 (2033)	12,5 (2026–2033)
Сегмент многоэтажных парковочных пространств Multi-storey parking spaces	2,94	–	–	5,10 (2033)	7,0 (2026–2033)

ских парковочных систем (среднегодовой темп роста 10,5 %).

Сложившаяся структура рынка во многом определяет тематику современных научных исследований. Проведенный обзор литературы показывает, что труды в области организации парковочных пространств охватывают широкий спектр направлений. Классические подходы к транспортному планированию и формированию парковочной политики [3, 4] дополняются разработкой оптимизационных математических моделей распределения парковочных мест [5–7], интеграцией парковочной инфраструктуры с зарядными станциями для электротранспорта [8, 9] и внедрением цифровых решений, в том числе платформ на основе технологии блокчейн [10]. Значительное место в литературе занимают исследования, посвященные моделированию поведения пользователей [11], экономической оценке регуляторных издержек [12], обеспечению безопасности и учету неопределенности в парковочных системах (включая вопросы безопасного маневрирования при парковке и неопределенности при подборе парковочного места) [13, 14], изучению общественного мнения о парковочной политике [15]. Кроме того, в литературе представлены библиометрический анализ и комплексный обзор публикаций по управлению парковочными пространствами [16], обобщение зарубежного опыта организации парковочных пространств [17], выявление факторов риска при выборе парковочного места [18], а также исследования новых форм городской мобильности, в том числе оценка эффективности парковочной политики для средств индивидуальной мобильности на основе анализа больших данных [19, 20] и вопросы интегра-

ции «умной» инфраструктуры и формирования «зеленых» транспортных систем [21, 22].

Важно отметить, что значительная часть перечисленных исследований ориентирована на условия мегаполисов. Так, вопросы интеграции зарядной инфраструктуры [8], поведенческие факторы внедрения электромобилей [9], эффективность парковочной политики для средств индивидуальной мобильности [19, 20], а также создание «умной» и «зеленой» транспортной инфраструктуры [21, 22] рассматриваются именно в контексте мегаполисов. Таким образом, специфика мегаполисов как среды реализации проектов парковочных пространств находит прямое отражение в современных научных работах. Вместе с тем комплексное изучение рисков проектов формирования парковочных пространств в мегаполисе в научной литературе отсутствует. Это обстоятельство обуславливает актуальность и научную значимость настоящего исследования, а также определяет его цель — разработка подхода к интегральной оценке рисков таких проектов. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить область управления рисками проектов формирования парковочных пространств в мегаполисе, установив тем самым границы исследования, выделив стадии жизненного цикла (ЖЦ) и целевые параметры указанных проектов;
- обосновать методы оценки рисков проектов образования парковочных пространств в мегаполисе, обеспечив выбор и адаптацию методов, применимых к специфике данного типа проектов;
- разработать подход к интегральной оценке рисков проектов формирования парковочных про-

странств в мегаполисе, объединив результаты первых двух этапов и получив возможность количественно определять совокупный уровень риска.

Проекты создания парковочных пространств в мегаполисе инициируются для достижения конкретных целей, которые задают временные рамки их ЖЦ и определяют ключевые параметры ожидаемых результатов. В то же время в современных условиях реализации только 16,2 % проектов признаются успешными — выполняются в установленные сроки и в рамках бюджета; 52,7 % проектов реализуются с превышением бюджета (в среднем на 89 %); 31,1 % проектов считаются нереализованными — отменяются, поставленные цели не достигаются⁵. Основными причинами сложившейся неблагоприятной ситуации в управлении проектами эксперты называют игнорирование на практике неопределенности и риска, а также низкую эффективность управления рисками проектов.

Высокая подверженность проектов формирования парковочных пространств в мегаполисе изменениям в условиях неопределенности [3, 4, 13, 14] подтверждает актуальность разработки подхода к их интегральной оценке. Традиционные методы, анализирующие риски изолированно, не позволяют оценить совокупное влияние риска на достижение целей проекта [12]. Предлагаемый интегральный подход к оценке рисков проектов создания парковочных пространств в мегаполисе направлен на количественную оценку итогового риска проекта с учетом влияния рисков на целевые параметры проекта в разрезе этапов ЖЦ, что дает возможность сформировать целостное представление об уровне рисков и создать аналитическую основу для принятия обоснованных управленческих решений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Первой задачей в исследовании является определение области применения управления рисками, которая характеризуется двумя основными компонентами: объектом управления (конкретными категориями рисков) и временными границами. Конкретизация *объекта управления* основывается на классификации рисков, позволяющей структурировать их по существенным признакам. В экономической литературе имеются различные подходы к данной классификации; их обобщение применительно к проектам образования парковочных пространств в мегаполисе отражено в табл. 2.

Анализ представленных подходов свидетельствует о том, что классификация рисков по этапам ЖЦ проекта является одной из наиболее распространенных: она представлена в работах Е.В. Духаниной, Ю.И. Ряжевой, Э. Флайта, З.А. К. Аль-Заиди и других авторов, а также закреплена в ГОСТ Р 72160–2025⁵.

⁵ ГОСТ Р 72160–2025. Менеджмент риска. Управление рисками проектов.

Внимание исследователей к данной классификации подтверждает ее важность для выделения конкретных категорий рисков (объекта управления) на каждой стадии ЖЦ, что имеет практическую значимость при управлении рисками проектов формирования парковочных пространств в мегаполисе. К основным преимуществам указанной классификации относят:

- целевую ориентацию, позволяющую установить прямую связь каждого идентифицированного риска с ключевыми параметрами проекта (сроки, стоимость, качество, безопасность и экология) на конкретном этапе, что создает основу для перехода от ситуационного управления к стратегическому, ориентированному на достижение целей;
- учет динамической природы рисков, выражающийся в их качественной трансформации в рамках каждого этапа и возможном изменении принадлежности к этапам в ходе реализации проекта, что отражает изменение совокупного риска во времени;
- оптимизацию управленческих процессов и повышение ответственности, достигаемые за счет закрепления процедур идентификации, оценки и мониторинга рисков за конкретными работами и заранее определенными ответственными лицами в рамках каждого этапа ЖЦ, что, в свою очередь, повышает эффективность управления проектами формирования парковочных пространств в мегаполисе;
- интеграцию процессов управления рисками в общее проектное управление, реализующую принцип сквозного управления рисками при одновременном сохранении дифференцированного подхода к их управлению на различных этапах ЖЦ, что создает основу для целостного и вместе с тем адаптивного управления проектом.

Совокупность перечисленных преимуществ служит достаточным обоснованием для выбора классификации рисков по этапам ЖЦ проекта в качестве основы управления рисками для рассматриваемого типа проектов.

В связи с выбором классификации по этапам ЖЦ особую важность приобретает второй компонент области применения — *определение временных границ управления рисками*. Для проекта образования парковочного пространства в мегаполисе обоснованным служит определение временных границ управления рисками, совпадающих с полным ЖЦ проекта. Именно такой расширенный подход обеспечивает всесторонний учет рисков, способных повлиять на достижение стратегических целей проекта формирования парковочных пространств в мегаполисе.

Проведенный анализ подходов к определению временных границ управления рисками позволил выделить ключевые этапы ЖЦ проекта, наиболее значимые с позиции управления рисками: планирование, проектирование, строительство и эксплуатацию. Правомочность применения этого подхода определяется двумя аспектами: 1) он представляет собой синтез научных взглядов исследователей и нормативных поло-

Табл. 2. Подходы к классификации рисков реализации проектов формирования парковочных пространств в мегаполисе
Table 2. Approaches to classifying risks in parking space development projects in a megacity

Классификационный признак Classification criterion	Авторы Authors	Классификация Classification
По источникам возникновения Sources of origin	Е.В. Духанина, А.Т. Хаметова [23] E.V. Dukhanina, A.T. Khametova [23] М.О. Габриелян, О.Б. Третьяков [24] M.O. Gabrielyan, O.B. Tretyakov [24]	• внешние риски / external risks; • внутренние риски / internal risks
По этапам ЖЦ проекта Stages of the project life cycle	Е.В. Духанина, А.Т. Хаметова [23] E.V. Dukhanina, A.T. Khametova [23]	• риски на этапе планирования / risks at the planning stage; • риски на этапе проектирования / risks at the design stage; • риски на этапе производства строительных работ / risks at the stage of construction work; • риски на этапе эксплуатации / risks at the operational stage
	Ю.И. Ряжева [25] Yu.I. Ryazheva [25]	• проектные риски предынвестиционного этапа / project risks at the pre-investment stage; • проектные риски инвестиционного этапа / project risks at the investment stage; • постинвестиционные (эксплуатационные) риски / post-investment (operational) risks
	Э. Флайт [26] A. Flight [26]	• риски на этапе проектирования / risks at the design stage; • риски на этапе строительства / risks at the construction stage; • риски на этапе ввода в эксплуатацию / risks at the commissioning stage; • риски на этапе эксплуатации / risks at the operational stage
	З.А.К. Аль-Заиди [27] Z.A.K. Al-Zaidi [27]	• риски этапе планирования проекта / risks at the project planning stage; • риски на этапе проектирования проекта / risks at the project design stage; • риски на этапе заключения контракта / risks at the contracting stage; • риски на этапе реализации строительного проекта / risks at the stage of construction project implementation; • риски на этапе эксплуатации строительного объекта / risks at the stage of construction site operation
	ГОСТ Р 72160–2025* / Russian National Standard GOST R 72160–2025	• риски на этапе инициирования и создания концепции проекта / risks at the stage of project initiation and concept development; • риски на этапе разработки проекта / risks at the project development stage; • риски на этапе создания продукта проекта / risks at the project deliverable development stage; • риски на этапе развертывания проекта / risks at the project deployment stage; • риски на этапе завершения проекта / risks at the project completion stage
По составу участников проекта Project participant composition	Е.В. Духанина, А.Т. Хаметова [23] E.V. Dukhanina, A.T. Khametova [23]	• риски заказчика / customer's risks; • риски застройщика / developer's risks; • риски инвестора / investor's risks; • риски подрядных и субподрядных организаций / contractor's and subcontractor's risks; • риски проектных и изыскательских организаций / designer's and surveyor's risks; • риски поставщика строительных материалов / building materials supplier's risks; • риски других участников проекта / other project participants' risks

Классификационный признак Classification criterion	Авторы Authors	Классификация Classification
По составу участников проекта Project participant composition	Э. Флайт [26] / A. Flight [26]	• риски инвестора / investor's risks; • риски кредитора / lender's risks; • риски постоянного кредитора проекта / risks of a permanent project lender; • риски подрядчика / contractor's risks; • риски оператора проекта / project operator's risks; • риски поставщика / supplier's risks; • риски покупателя / buyer's risks; • риски принимающего государства / risks of the host state; • риски других государств / risks of other states; • риски акционерного инвестора / equity investor's risks
	М.В. Некрасова, С.В. Калошина [28] M.V. Nekrasova, S.V. Kaloshina [28]	• риски инвестора / investor's risks; • риски застройщика / developer's risks; • риски генерального подрядчика / general contractor's risks; • риски подрядчика / contractor's risks; • риски проектировщика / designer's risks
По уровню возникновения Level of risk occurrence	М.В. Федоров, Е.Г. Матыс [29] M.V. Fedorov, E.G. Matys [29]	• на уровне проектной документации / at the level of project documentation; • на уровне подрядчика / at the contractor level; • на уровне эксплуатационной организации / at the level of the management organization
По влиянию на проект Project impact	М.В. Федоров, Е.Г. Матыс [29] M.V. Fedorov, E.G. Matys [29]	• приводящие к прекращению проекта / leading to project termination; • приводящие к приостановке реализации проекта / leading to project suspension; • приводящие к сбоям в работе проекта / leading to project failures; • не влияющие на проект существенно / risks with no significant impact on the project
	М.А. Логинова [30] M.A. Loginova [30]	• риск неосуществимости проекта / project infeasibility risk; • риск убыточности проекта / project unprofitability risk; • риск консервации проекта / project suspension risk; • риск невыполнения договорных обязательств / contractual non-performance risk; • риск неполучения внешних инвестиций и кредитов / risk of failure to secure external investment and loans
По сфере возникновения Sphere of origin	Г.А. Гульмагомедова, И.В. Курков [31] G.A. Gulmagomedova, I.V. Kurkov [31]	• производственные риски / production risks; • коммерческие риски / commercial risks; • финансовые риски / financial risks
	Ю.А. Кулик, В.Н. Волович, Н.Г. Привалов, А.Н. Козловский [32] Yu.A. Kulik, V.N. Volovich, N.G. Privalov, A.N. Kozlovsky [32]	• экономические риски / economic risks; • политические риски / political risks; • социальные риски / social risks; • экологические риски / environmental risks; • нормативно законодательные риски / regulatory and legal risks
	М.В. Федоров, Е.Г. Матыс [29] M.V. Fedorov, E.G. Matys	• финансовые риски / financial risks; • экономические риски / economic risks; • технологические риски / technological risks; • поведенческие риски / behavioral risks; • ситуационные риски / situational risks

жений национального стандарта ГОСТ Р 72160–2025⁵, что обеспечивает научную и нормативную обоснованность выбранного подхода; 2) рассматриваемый подход в полной мере отражает структуру инвестиционно-строительного цикла, последовательно включающего этапы: от формирования инвестиционного замысла и обоснования целесообразности (планирование) через детальную инженерно-техническую разработку (проектирование) и физическую реализацию объекта (строительство) к конечному этапу эксплуатации, направленному на достижение запланированных экономических, социальных, экологических и других результатов.

В соответствии с этой структурой в рамках подхода выделены ключевые процессы и главные результаты каждого этапа ЖЦ проекта формирования парковочного пространства в мегаполисе. Их состав не является произвольным: он установлен в соответствии с требованиями основных нормативных документов, регулирующих градостроительную и инвестиционно-строительную деятельность в Российской Федерации (Градостроительный кодекс РФ⁶,

⁶ Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/

Постановление Правительства РФ о составе разделов проектной документации⁷, регламенты выдачи решений⁷). Такой подход обеспечивает нормативно регламентную обоснованность выделенных этапов и их содержания. Характеристика этапов ЖЦ проекта формирования парковочного пространства в мегаполисе, включающая ключевые процессы и ожидаемые результаты, приведена в табл. 3.

Однако при управлении рисками недостаточно одного качественного описания этапов, необходима система целевых параметров, позволяющая фиксировать отклонения и оценивать эффективность реализации проекта. Соответствующие целевые параметры, сгруппированные по этапам ЖЦ, представлены в табл. 4.

Выбор целевых параметров обусловлен классической проектной триадой Iron Triangle⁸ — «Сроки», «Стоимость», «Качество», к которой в контексте современных требований к устойчивому развитию

⁷ О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию : Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 № 87 (ред. от 21.10.2025).

⁸ ISO 21500:2021. Project, programme and portfolio management — Context and concepts. URL: www.iso.org/standard/75704.html

Табл. 3. Характеристика этапов жизненного цикла проекта формирования парковочного пространства в мегаполисе
Table 3. Life-cycle stages of a parking space development project in a megacity

Элемент Element	Этап жизненного цикла / Life cycle stage			
	Планирование / Planning	Проектирование / Design	Строительство Construction	Эксплуатация Operation
Ключевые процессы / Key processes	Стратегическое обоснование проекта. Анализ территории, градостроительных ограничений, оценка спроса и экономической целесообразности. Разработка концепции, бизнес-модели, предварительных технико-экономических расчетов. Получение согласований и предварительных заключений от разрешительных и надзорных органов	Детальная инженерная и архитектурная проработка утвержденной концепции. Проведение изысканий, разработка проектной и рабочей документации, прохождение государственных и негосударственных экспертиз, получение разрешения на строительство	Физическая реализация проекта. Организация стройплощадки, выполнение строительно-монтажных работ, поставка оборудования, авторский и технический надзор, взаимодействие с подрядчиками и субподрядчиками. Сдача объекта в эксплуатацию	Использование построенного объекта парковки по назначению для достижения запланированного экономического и социального эффекта. Техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонт, оказание услуг парковки, управление доходами и расходами
	Strategic justification of the project, including analysis of the site, urban-planning restrictions, demand, and economic feasibility; development of the project concept, business model, and preliminary technical and economic calculations; obtaining approvals and preliminary opinions from regulatory and supervisory authorities	Detailed engineering and architectural development of the approved concept, including surveys, preparation of design and working documentation, state and non-state expert reviews, and obtaining a construction permit	Physical implementation of the project, including construction-site organization, execution of construction and installation, equipment supply, design and technical supervision, coordination with contractors and subcontractors, and commissioning of the facility	Operation of the constructed parking facility for its intended purpose to achieve the planned economic and social effects. Maintenance, routine and major repairs, provision of parking services, and management of revenues and expenses

Элемент Element	Этап жизненного цикла / Life cycle stage			
	Планирование / Planning	Проектирование / Design	Строительство Construction	Эксплуатация Operation
Основной результат / The main result	Утвержденная концепция проекта, технико-экономическое обоснование (ТЭО), предварительное согласование места размещения Approved project concept, feasibility study (FE), preliminary site selection	Полный комплект согласованной проектно-сметной документации, разрешительная документация для строительства A complete set of approved design and budget documentation and construction permits	Построенный, готовый к эксплуатации объект (парковочное пространство), акты ввода в эксплуатацию Constructed, ready-to-use facility (parking space), commissioning certificates	Стабильный операционный денежный поток от эксплуатационной деятельности, удовлетворенность пользователей, выполнение социальной функции (разгрузка уличной сети, удовлетворенность местных жителей) Stable operating cash flow, user satisfaction, and fulfilment of the facility's social function, including street-network relief and local residents' satisfaction

Табл. 4. Целевые параметры проекта формирования парковочного пространства по этапам жизненного цикла

Table 4. Target parameters of a parking space development project across life-cycle stages

Целевой параметр Target parameter	Этап жизненного цикла / Life cycle stage			
	Планирование Planning	Проектирование Design	Строительство Construction	Эксплуатация / Operation
Срок Deadline	Сроки подготовки предпроектной документации Deadlines for preparation of pre-project documentation	Сроки подготовки проектной документации Deadlines for the preparation of project documentation	Сроки строительства Construction deadlines	Сроки периода окупаемости инвестиций Investment payback period
Стоимость Cost	Стоимость этапа предпроектной подготовки The cost of the pre-project preparation stage	Стоимость этапа проектирования The cost of the design stage	Затраты на этапе строительства Costs of the construction stage	Эксплуатационные затраты. Прибыль от оказания услуг Operating costs Profit from service provision
Качество Quality	Качество подготовки предпроектной документации Pre-project documentation preparation quality	Качество подготовки проектной документации Project documentation preparation quality	Качество выполнения строительно-монтажных работ Construction and installation quality	Качество предоставляемых услуг/ Quality of services
Безопасность и экология Safety and environmental protection	—	—	Безопасность жизни и здоровья людей. Экологическое воздействие / Safety of human life and health. Environmental impact	Безопасность жизни и здоровья людей. Экологическое воздействие Safety of human life and health. Environmental impact

и социальной ответственности добавлен параметр «Безопасность и экология»⁹. Эти параметры выполняют двоякую функцию: они являются эталонными (плановыми) показателями успешности этапа и одновременно основными объектами потенциального негативного воздействия при реализации рисков.

На основе выделенных стадий ЖЦ и целевых параметров осуществляется *переход к задаче по оценке рисков*. Решение данной задачи требует обоснованного выбора методов оценки, что определяет необходимость их классификации применительно к рассматриваемому типу проектов. В рамках настоящего исследования применяется двухуровневый подход к идентификации рисков, отражающий логику «Целевой параметр — риск». Этот подход реализуется на двух взаимосвязанных уровнях. *На первом (базовом) уровне* риски идентифицируются с точки зрения их потенциального воздействия на целевые параметры каждого этапа ЖЦ. Для наглядной систематизации используется матричная структура, где по вертикали расположены целевые параметры, а по горизонтали — этапы. *На втором (аналитическом) уровне* каждый идентифицированный риск классифицируется по типу, что служит для понимания его природы и определения уровня управления:

- стратегические риски влияют на достижение ключевых целей проекта и требуют реагирования на уровне высшего руководства;
- операционные риски связаны со сбоями в процессах (строительных, технологических, эксплуатационных) и контролируются на уровне линейных руководителей;
- финансовые, технические, нормативно-правовые и иные типы рисков конкретизируют сферу их возникновения (финансовую, техническую, правовую и т.д.).

Идентификация рисков осуществлялась с использованием систематизирующего метода на основе контрольных списков и типовой классификации рисков, что позволило на базе отраслевых нормативов и практики девелоперов сформировать структурированный перечень потенциальных рисков. Результаты идентификации были систематизированы в форме матрицы, объединяющей выявленные риски с целевыми параметрами проекта и этапами ЖЦ. Для обеспечения однозначности и сопоставимости формулировка каждого риска унифицирована по следующему шаблону: «Риск (сущность события), ведущий к (ключевое последствие для целевого параметра)». Соответствующая матрица рисков проекта формирования парковочного пространства в мегаполисе приведена в табл. 5.

На базе разработанной матрицы идентификации рисков сформирована их типология, представляющая собой систему классификации всех выявленных рисков по совокупности универсальных призна-

ков (табл. 6). Данный подход обеспечивает переход от анализа единичных рисков к анализу обобщенных категорий, что создает концептуальную основу для стратегического управления рисками на уровне проекта.

На основе сформированных матриц идентификации и типологии рисков осуществляется переход к задаче по их оценке. Решение этой задачи требует обоснованного выбора методов оценки рисков, что обуславливает необходимость их классификации применительно к рассматриваемому типу проектов. Классификация методов оценки рисков проектов формирования парковочных пространств в мегаполисе представлена в табл. 7.

Представленная в табл. 7 классификация построена по двум ключевым критериям: этап оценки риска (идентификация, анализ, оценка допустимости и значимости риска, выбор между вариантами) и природа метода оценки (качественные, полуколичественные, количественные). Методы оценки отобраны и адаптированы с учетом специфики строительных и инфраструктурных проектов, реализуемых в условиях высокой неопределенности внешней среды мегаполиса, обусловленной динамикой градостроительных ограничений, изменчивостью регуляторных требований и рыночной конъюнктуры. Ввиду уникальности проектов формирования парковочных пространств в мегаполисе и отсутствия репрезентативной статистической базы для подобных объектов, приоритет был отдан полуколичественным экспертным методам, основанным на экспертных суждениях. Данные методы дают возможность осуществить преобразование качественных описаний рисков в формализованные количественные оценки, используемые для последующей математической обработки.

В качестве главного метода анализа рисков выбран экспертный опрос (анкетирование), применение которого позволяет компенсировать недостаток репрезентативных статистических сведений и получить согласованные количественные оценки по трем параметрам:

- вероятность P — оценивает возможность наступления рискового события в рамках проекта по 5-балльной шкале, где 1 балл соответствует очень низкой вероятности, а 5 баллов — очень высокой;
- влияние I — оценивает степень негативного воздействия реализовавшегося риска на целевые параметры проекта (сроки, стоимость, качество, безопасность и экология) по 5-балльной шкале, где 1 балл соответствует незначительному отклонению, а 5 баллов — критическому;
- управляемость C — оценивает потенциал проектной команды по контролю риска или смягчению его последствий по 5-балльной шкале, где 1 балл соответствует полному внутреннему контролю, а 5 баллов — полному отсутствию контроля (внешние, форс-мажорные факторы).

⁹ The GPM P5 Standard for Sustainability in Project Management v3.1. URL: <https://gpm.org/p5>

Табл. 5. Матрица рисков проекта формирования парковочного пространства в мегаполисе

Table 5. Risk matrix for a parking space development project in a megacity

Целевой параметр Target parameter	Этап жизненного цикла / Life cycle stage							
	Планирование / Planning		Проектирование / Design		Строительство / Construction		Эксплуатация / Operation	
	Риск / Risk	Обозначение Designation	Риск / Risk	Обозначение Designation	Риск / Risk	Обозначение Designation	Риск / Risk	Обозначение Designation
Срок / Term	Риск превышения плановых сроков подготовки концепции проекта вследствие сложности прохождения обязательных регуляторных и градостроительных согласований, ведущих к задержке всего календарного графика проекта. <i>Tip: операционный</i> Risk of delay in preparing the project concept due to the complexity of obtaining mandatory regulatory and urban-planning approvals, resulting in delays to the overall project schedule. <i>Type: operational</i>	R_{11}	Риск превышения сроков проектирования вследствие многоэтапных согласований проектной документации с надзорными органами и экспертами, ведущий к задержке выхода на этап строительства. <i>Tip: операционный</i> Risk of delays in the design stage due to multi-stage approval of design documentation by supervisory authorities and expert review bodies, resulting in delayed transition to the construction stage. <i>Type: operational</i>	R_{21}	Риск превышения сроков строительства вследствие низкой производительности подрядчиков или логистических сбоев, ведущий к задержке сдачи объекта. <i>Tip: операционный</i> Risk of construction delays due to low contractor productivity or logistics disruptions, resulting in delayed commissioning of the facility. <i>Type: operational</i>	R_{31}	Риск увеличения сроков планового ремонта парковочного пространства вследствие дефицита специалистов или материалов, ведущий к увеличению времени простоя объекта. <i>Tip: операционный</i> Risk of extended scheduled repair periods for the parking facility due to shortages of specialists or materials, resulting in increased facility downtime. <i>Type: operational</i>	R_{41}
Стоимость Cost	Риск занижения сметных показателей на стадии предынвестиционных исследований вследствие недостаточной детализации работ, ведущей к формированию финансовой модели проекта с существенными искажениями. <i>Tip: стратегический</i> Risk of underestimating cost indicators at the pre-investment study stage due to insufficient work breakdown detail, resulting in major distortions in the project financial model. <i>Type: strategic</i>	R_{12}	Риск превышения плановой стоимости проектирования вследствие необходимости внесения существенных изменений в проектную документацию, ведущий к превышению плановых затрат на подготовительной стадии строительства. <i>Tip: операционный</i> Risk of exceeding the planned design cost due to the need for substantial revisions to the design documentation, resulting in cost overruns at the pre-construction stage. <i>Type: operational</i>	R_{22}	Риск превышения сметы строительства вследствие выявления скрытых работ или роста цен на материалы, ведущий к бюджетному дефициту проекта. <i>Tip: операционный</i> Risk of exceeding the construction cost estimate due to the discovery of concealed works or increases in material prices, resulting in a project budget deficit. <i>Type: operational</i>	R_{32}	Риск снижения выручки вследствие незагрузки парковочного пространства или неоплаты услуг, ведущий к падению рентабельности и увеличению срока окупаемости. <i>Tip: операционный</i> Risk of reduced revenue due to underutilization of the parking facility or non-payment for services, resulting in lower profitability and a longer payback period. <i>Type: operational</i>	R_{42}

Продолжение табл. 5 / Continuation of the Table 5

Целевой параметр Target parameter	Этап жизненного цикла / Life cycle stage							
	Планирование / Planning		Проектирование / Design		Строительство / Construction		Эксплуатация / Operation	
	Риск / Risk	Обозначение Designation	Риск / Risk	Обозначение Designation	Риск / Risk	Обозначение Designation	Риск / Risk	Обозначение Designation
Стоимость Cost	Риск ошибок в ТЭО вследствие неверных прогнозов спроса или стоимости ресурсов, ведущих к принятию экономически неосостоятельного инвестиционного решения. <i>Тип: стратегический</i> Risk of errors in the feasibility study due to incorrect demand or resource-cost forecasts, resulting in an economically unsound investment decision. <i>Type: strategic</i>	R_{13}	Риск занижения сметных показателей на стадии предынвестиционных исследований вследствие недостаточной детализации работ, ведущих к формированию финансовой модели проекта с существенными искажениями. <i>Тип: стратегический</i> Risk of underestimating cost indicators at the pre-investment study stage due to insufficient work breakdown detail, resulting in major distortions in the project financial model. <i>Type: strategic</i>	R_{22}	Риск возникновения штрафных санкций вследствие срыва договорных сроков, ведущих к дополнительным финансовым потерям. <i>Тип: операционный</i> Risk of penalties due to failure to meet contractual deadlines, resulting in additional financial losses. <i>Type: operational</i>	R_{33}	Риск роста операционных расходов сверхплановых вследствие роста тариффов или неэффективного управления, ведущих к снижению чистой прибыли. <i>Тип: операционный</i> Risk of operating expenses exceeding planned levels due to tariff increases or inefficient management, resulting in reduced net profit. <i>Type: operational</i>	R_{43}
	Риск изменения ключевой процентной ставки Центрального банка Российской Федерации или условий кредитования в течение проекта, ведущих к удорожанию заемного финансирования и росту общей стоимости. <i>Тип: внешний</i> Risk of changes in the key interest rate of the Central Bank of the Russian Federation or in lending terms during project implementation, resulting in higher debt financing costs and an increase in the total project cost. <i>Type: external</i>	R_{14}	Риск введения новых ограничительных нормативных актов (экологических, градостроительных, санитарных) после начала проектирования, ведущих к необходимости дорогостоящих переработок и согласований. <i>Тип: внешний</i> Risk of new restrictive regulations being introduced after the start of design, including environmental, urban-planning, or sanitary requirements, resulting in the need for costly revisions and additional approvals. <i>Type: external</i>	R_{23}	Риск резкого роста цен на строительные материалы (металл, цемент) или топливо вследствие макроэкономической нестабильности или геополитических событий, ведущих к существенному превышению сметы. <i>Тип: внешний</i> Risk of a sharp increase in construction material prices, including metal and cement, or fuel prices due to macroeconomic instability or geopolitical events, resulting in a significant cost-estimate overrun. <i>Type: external</i>	R_{34}	Риск снижения платежеспособного спроса на услуги парковочных пространств в мегаполисе из-за совокупного действия макроэкономических, поведенческих и регуляторных факторов, ведущих к финансовой несостоятельности проекта. <i>Тип: внешний</i> Risk of reduced effective demand for parking services in a megacity due to the combined effect of macroeconomic, behavioral, and regulatory factors, resulting in the financial insolvency of the project. <i>Type: external</i>	R_{44}

Продолжение табл. 5 / Continuation of the Table 5

Целевой параметр Target parameter	Этап жизненного цикла / Life cycle stage							
	Планирование / Planning		Проектирование / Design		Строительство / Construction		Эксплуатация / Operation	
	Риск / Risk	Обозначение Designation	Риск / Risk	Обозначение Designation	Риск / Risk	Обозначение Designation	Риск / Risk	Обозначение Designation
Качество Quality	Риск получения недостовверных исходных данных для разработки концепции проекта вследствие недостаточно глубокого (поверхностного) анализа, ведущий к формированию проекта, не отвечающего установленным критериям эффективности проекта. <i>Тип: стратегический</i> Risk of obtaining unreliable input data for developing the project concept due to insufficiently detailed analysis, resulting in a project that does not meet the established efficiency criteria. <i>Type: strategic</i>	R_{15}	Риск разработки некачественной проектной документации вследствие ошибок или несоблюдения стандартов, ведущий к невозможности ее реализации без дорогостоящих переделок. <i>Тип: операционный</i> Risk of poor-quality design documentation due to errors or non-compliance with standards, resulting in documentation that cannot be implemented without costly revisions. <i>Type: operational</i>	R_{24}	Риск некачественного выполнения строительно-монтажных работ вследствие нарушений проектных решений или применения материалов, не соответствующих установленным требованиям, приводящий к снижению ключевых эксплуатационных характеристик проекта и сокращению проектного срока службы объекта. <i>Тип: операционный</i> Risk of poor-quality construction and installation works due to deviations from design solutions or the use of materials that do not meet established requirements, resulting in lower key operational performance characteristics and a reduced service life of the facility. <i>Type: operational</i>	R_{35}	Риск низкого качества услуг парковочных пространств вследствие сбоя оборудования или недостатков управленческих процессов, ведущих к неудовлетворенности пользователей и потере репутации. <i>Тип: операционный</i> Risk of poor quality of parking services due to equipment failures or deficiencies in management processes, resulting in user dissatisfaction and reputational damage. <i>Type: operational</i>	R_{45}
Безопасность и экология Safety and environment	Риск неучета экологических ограничений при выборе места размещения объекта строительства вследствие неполного анализа, ведущий к возникновению разногласий с надзорными органами и общественностью. <i>Тип: операционный</i> Risk of failure to account for environmental restrictions when selecting the construction site due to incomplete analysis, resulting in disputes with supervisory authorities and the public. <i>Type: operational</i>	R_{16}	Риск несоответствия проектной документации нормам безопасности и экологии вследствие ошибок в проектной документации, ведущий к отказу в положительном заключении экспертизы. <i>Тип: операционный</i> Risk of non-compliance of design documentation with safety and environmental requirements due to documentation errors, resulting in refusal to issue a positive expert review opinion. <i>Type: operational</i>	R_{25}	Риск аварий и травматизма на стройплощадке вследствие нарушений требований охраны труда, ведущий к человеческим жертвам, остановке работ и юридической ответственности. <i>Тип: операционный</i> Risk of accidents and injuries on the construction site due to violations of occupational health and safety requirements, resulting in casualties, work stoppages, and legal liability. <i>Type: operational</i>	R_{36}	Риск возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации (пожар, обрушение) вследствие скрытых дефектов строительств или износа, ведущий к угрозе жизни и здоровья людей. <i>Тип: операционный</i> Risk of emergency situations during operation, including fire or structural collapse, due to concealed construction defects or wear and tear, posing a threat to human life and health. <i>Type: operational</i>	R_{46}

Целевой параметр Target parameter	Этап жизненного цикла / Life cycle stage							
	Планирование / Planning		Проектирование / Design		Строительство / Construction		Эксплуатация / Operation	
	Риск / Risk	Обозначение Designation	Риск / Risk	Обозначение Designation	Риск / Risk	Обозначение Designation	Риск / Risk	Обозначение Designation
Безопасность и экология Safety and environment	Риск возникновения социального сопротивления вследствие недоучета интересов местного сообщества, ведущий к приостановке или существованию усложнению реализации проекта. <i>Тип: операционный</i> Risk of social opposition due to insufficient consideration of local community interests, resulting in suspension or significant complications in project implementation. <i>Type: operational</i>	R_{17}	Риск несоответствия проектной документации нормам безопасности и экологии вследствие ошибок в проектной документации, ведущий к отказу в положительном заключении экспертизы. <i>Тип: операционный</i> Risk of non-compliance of design documentation with safety and environmental requirements due to documentation errors, resulting in refusal to issue a positive expert review opinion. <i>Type: operational</i>	R_{25}	Риск приостановки строительства надзорными органами вследствие выявленных нарушений экологических норм, ведущий к задержкам и штрафам. <i>Тип: операционный</i> Risk of construction suspension by supervisory authorities due to identified violations of environmental regulations, resulting in delays and fines. <i>Type: operational</i>	R_{37}	Риск негативного воздействия на окружающую среду сверх допустимого (шум, выбросы) вследствие неэффективной работы систем, ведущий к экологическим штрафам и репутационному ущербу. <i>Тип: операционный</i> Risk of environmental impacts exceeding permissible limits, including noise and emissions, due to inefficient system operation, resulting in environmental fines and reputational damage. <i>Type: operational</i>	R_{47}

Табл. 6. Систематизация рисков проекта по категориям: стратегические, операционные, внешние
Table 6. Project risk systematization by category: strategic, operational, and external risks

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

Категория риска Risk category	Определение и характеристики Definition and characteristics	Конкретные риски проекта формирования парковочного пространства в мегаполисе Specific risks of a parking space development project in a megacity
Стратегические риски Strategic risks	Риски, обусловленные ошибками на стадии концептуализации и стратегического планирования проекта. Реализация данных рисков ставит под вопрос жизнеспособность и экономическую обоснованность проекта в целом. Управление осуществляется на уровне высшего руководства и инвесторов Risks caused by errors at the project conceptualization and strategic planning stage. If realized, these risks may call into question the overall viability and economic feasibility of the project. They are managed at the level of senior management and investors.	Риски стоимости: R_{12}, R_{13}, R_{44} Cost risks R_{12}, R_{13}, R_{44} Риски качества: R_{15} / Quality risks R_{15}
Операционные риски Operational risks	Риски, возникающие в ходе реализации проектных процессов на различных этапах ЖЦ. Связаны с исполнением, контролем, координацией и обеспечением ресурсами. Управление осуществляется на уровне проектных менеджеров и линейных руководителей Risks arising during the implementation of project processes at various life-cycle stages. These risks are related to execution, control, coordination, and resource provision. They are managed at the level of project managers and line managers.	Риски сроков: $R_{11}, R_{21}, R_{31}, R_{41}$ Timing risks $R_{11}, R_{21}, R_{31}, R_{41}$ Риски стоимости: R_{22}, R_{24}, R_{32} Cost risks R_{22}, R_{24}, R_{32} Риски качества: $R_{33}, R_{35}, R_{42}, R_{43}, R_{45}$ Quality risks $R_{33}, R_{35}, R_{42}, R_{43}, R_{45}$ Риски безопасности и экологии: $R_{16}, R_{17}, R_{25}, R_{36}, R_{37}, R_{46}, R_{47}$ Safety and environmental risks $R_{16}, R_{17}, R_{25}, R_{36}, R_{37}, R_{46}, R_{47}$
Внешние риски External risks	Риски, источник которых находится вне зоны контроля проектной команды и организации в целом. Обусловлены изменениями в макроэкономической, правовой, политической и рыночной среде. Управление требует применения стратегий адаптации и смягчения последствий Risks whose sources lie beyond the control of the project team and the company as a whole. These risks are caused by changes in the macroeconomic, legal, political, and market environment. Their management requires adaptation and mitigation strategies.	Риски стоимости: R_{14}, R_{23}, R_{34} Cost risks R_{14}, R_{23}, R_{34}

Табл. 7. Систематизация методов оценки рисков и обоснование их применения в управлении рисками проектов формирования парковочных пространств
Table 7. Systematization of risk assessment methods and rationale for their application in the risk management of parking space development projects

Этап оценки Assessment stage	Группа методов Group of methods	Методы / Methods	Цель применения / Purpose of application	Обоснование применения / Rationale for application
Идентификация Identification	Систематизирующие методы Systematizing methods	Контрольные списки / Checklists Классификация по типам (стратегические, операционные, внешние) Classification by type (strategic, operational, external)	1. Системная идентификация типовых рисков строительных и инфраструктурных проектов. Systematic identification of typical risks in construction and infrastructure projects. 2. Формирование структурированной матрицы рисков / Development of a structured risk matrix	Позволяют обеспечить полную выявление рисков за счет использования общепринятых отраслевых классификаторов и нормативов (метод контрольных списков), включая SWOT-анализ для выявления факторов внутренней и внешней среды проекта (сильные и слабые стороны, возможности, угрозы) и PEST-анализ для прогнозирования макроэкономических (внешних) факторов риска (политических, экономических, социально-культурных, технологических). Кроме того, дают возможность структурировать выявленные риски по типам для последующего анализа и управления (метод классификации по типам), обеспечивая сопоставимость результатов с аналогичными проектами These methods ensure comprehensive risk identification through generally accepted industry classifications and regulatory requirements, including the checklist method; identify internal and external project-environment factors using SWOT analysis; forecast macroeconomic, or external, risk factors (including political, economic, sociocultural, and technological risk factors) using PEST analysis; and structure identified risks by type for subsequent analysis and management classification by type), thereby ensuring comparability with similar projects
	Методы сценарного анализа Scenario analysis methods	Структурированный метод «Что если?» / Structured “What If?” Technique (SWIFT). Анализ сценариев / Scenario analysis	Выявление специфических рисков, характерных для локации в условиях плотной городской застройки Identification of risks specific to locations in dense urban areas	Позволяют выявить отклонения от ожидаемого результата за счет систематического анализа нестандартных ситуаций, специфичных для мегаполиса (наличие скрытых инженерных коммуникаций, изменение транспортных потоков, обнаружение объектов культурного наследия) (структурированный метод «Что если?» (SWIFT)), а также исследовать вариативность развития событий путем построения и анализа альтернативных сценариев при различных сочетаниях факторов неопределенности (метод анализа сценариев), дополняя результаты систематизирующих методов These methods identify deviations from the expected outcome through a systematic analysis of non-standard situations specific to a megacity, including the presence of hidden utility networks, changes in traffic flows, and the discovery of cultural heritage sites, using the Structured What-If Technique (SWIFT). They also make it possible to examine the variability of possible developments by constructing and analyzing alternative scenarios under different combinations of uncertainty factors using the scenario analysis method, thereby complementing the results obtained through systematization methods

Продолжение табл. 7 / Continuation of the Table 7

Этап оценки Assessment stage	Группа методов Group of methods	Методы / Methods	Цель применения / Purpose of application	Обоснование применения / Rationale for application
Анализ Analysis	Экспертные методы / Expert methods	Структурированные интервью. Method of Delphi. Попарное сравнение Pairwise comparison	1. Формирование консолидированной экспертной оценки / Consolidated expert assessment. 2. Определение относительной значимости рисков и этапов жизненного цикла проекта Identifying the relative importance of risks and project lifecycle stages	Позволяют минимизировать влияние группового давления на объективность экспертных суждений и сформировать консенсусную экспертную оценку по качественным (слабоформализуемым) аспектам рисков за счет анонимности и последовательного уточнения мнений при проведении многотуровых опросов (метод Делфи), обеспечить глубину и гибкость сбора первичной информации (метод структурированного интервью), а также определить приоритеты внутри однородных групп рисков (метод попарного сравнения) These methods minimize the influence of group pressure on the objectivity of expert judgments and support the formation of a consensus-based expert assessment of qualitative, or weakly formalized, aspects of risks through anonymity and the successive refinement of opinions in multi-round Delphi surveys. They also ensure depth and flexibility in collecting primary information through structured interviews and make it possible to set priorities within homogeneous risk groups using pairwise comparison
	Оценочные методы на основе экспертных суждений Evaluation methods based on expert opinions	Экспертный опрос (анкетирование) Expert survey (questionnaire)	Сбор индивидуальных экспертных оценок вероятности (P), влияния (I) и управляемости (C) рисков по 5-балльным шкалам Collection of individual expert assessments of probability (P), impact (I) and controllability (C) of risks using 5-point scales	Позволяет получить первичные количественные данные для последующей обработки за счет стандартизации сбора данных и возможности охвата большого числа экспертов по сравнению с интервью This method enables the collection of primary quantitative data for subsequent processing by standardizing data collection and allowing a larger number of experts to be surveyed compared with interviews
	Полуколиче- ственные экс- пертные мето- ды Semi-quantitative expert methods	Матрица последствий/вероятности Consequence/Probability matrix	1. Формализация экспертных оценок с переводом в балльные значения / Formalization of expert assessments and their conversion into point scores. 2. Визуализация и ранжирование рисков по уровню значимости Visualization and ranking of risks by level of significance. 3. Приведение разнородных рисков к сопоставимому виду Bringing heterogeneous risks into a comparable form	Позволяет обеспечить наглядность и единое понимание уровня риска среди всех стейкхолдеров, а также сформировать входные данные для интегральной оценки, являясь общепринятым отраслевым инструментом управления рисками. Метод основан на комбинировании оценок вероятности и последствий и управляемости для определения значимости каждого риска и его позиционирования в матрице This method ensures visual clarity and a shared understanding of risk levels among all stakeholders, while also generating input data for integrated assessment as a widely accepted industry risk management tool. The method is based on combining assessments of probability, consequences, and manageability to determine the significance of each risk and its position within the matrix

Продолжение табл. 7 / Continuation of the Table 7

Этап оценки Assessment stage	Группа методов Group of methods	Методы / Methods	Цель применения / Purpose of application	Обоснование применения / Rationale for application
Анализ Analysis	Количественные и интеграционные методы Quantitative and integrative methods	Методы интегральных сверток: метод многокритериального идеально-реального сравнительного анализа и метод упорядочения предпочтений по сходству с идеальным решением. Multi-Attributive Ideal-Real Comparative Analysis (MAIRCA). Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). Анализ чувствительности. Sensitivity Analysis. Построение S-кривых (кумулятивное распределение) Construction of S-curves (cumulative distribution)	1. Расчет интегральных показателей рисков этапов ЖЦ проекта и проекта в целом. Calculation of integrated risk indicators for project life-cycle stages and for the project as a whole. 2. Выявление ключевых факторов риска / Identification of key risk factors. 3. Оценка совокупного вероятностного воздействия рисков на целевые параметры проекта / Assessment of the cumulative probabilistic impact of risks on the project's target parameters.	Позволяют агрегировать разнородные экспертные оценки по множеству параметров (вероятность, влияние, управляемость) в единый интегральный показатель и построить профиль риска с заданной достоверностью (методы интегральных сверток MAIRCA, TOPSIS), выявить параметры, оказывающие максимальное влияние на результирующие показатели, путем варьирования значений в диапазоне практической изменчивости (анализ чувствительности), а также оценить совокупное вероятностное воздействие рисков на целевые параметры проекта с учетом временной динамики посредством построения интегральной функции распределения (S-кривые) These methods make it possible to aggregate heterogeneous expert assessments across multiple parameters, including probability, impact, and manageability, into a single integrated indicator and to construct a risk profile with a specified level of reliability using integral aggregation methods such as MAIRCA and TOPSIS. They also make it possible to identify the parameters that have the greatest influence on the resulting indicators by varying their values within the range of practical variability using sensitivity analysis, as well as to assess the cumulative probabilistic impact of risks on the project's target parameters, taking temporal dynamics into account, by constructing a cumulative distribution function in the form of S-curves

Окончание табл. 7 / End of the Table 7

Этап оценки Assessment stage	Группа методов Group of methods	Методы / Methods	Цель применения / Purpose of application	Обоснование применения / Rationale for application
Оценка допустимости и значимости риска Assessment of risk acceptability and significance	Оценка допустимости и значимости риска Assessment of risk acceptability and significance	Метод снижения рисков до уровня, достижимого с учетом разумных затрат. ALARP (As Low As Reasonably Practicable). Метод обеспечения безопасности деятельности настолько, насколько это разумно, практически осуществимо SFAIRP (So Far As Is Reasonably Practicable)	Определение социально и экономически приемлемого (допустимого) уровня остаточного риска Determination of the socially and economically acceptable, or permissible, level of residual risk	Позволяют определить момент, когда затраты на дальнейшее снижение риска становятся несоразмерными получаемой выгодой, выступая в качестве критериев для принятия решения о необходимости изменения риска. Метод ALARP ориентирован на достижение минимально возможного уровня риска с учетом экономически оправданных затрат, тогда как метод SFAIRP представляет собой демонстрацию того, что принятые меры снижают риск на столько, насколько это практически осуществимо These methods make it possible to determine the point at which the costs of further risk reduction become disproportionate to the benefits obtained, thereby serving as criteria for deciding whether risk modification is necessary. The ALARP method is aimed at achieving the lowest reasonably practicable level of risk, taking into account economically justified costs, whereas the SFAIRP method demonstrates that the measures adopted reduce risk so far as is feasible.
Выбор между вариантами Choosing between the options	Методы сравнительного анализа и обоснования решений Methods of comparative analysis and justification of decisions	Анализ затрат и выгод. Cost-Benefit Analysis, CBA. Анализ дерева решений Decision Tree Analysis	1. Сравнительный анализ и выбор оптимальных вариантов управленческих решений / Comparative analysis and selection of optimal management decision options. 2. Экономическое обоснование затрат на мероприятия по снижению рисков Economic justification of the costs of risk reduction measures	Позволяют количественно оценить эффективность различных альтернативных мер путем сопоставления затрат и выгод в денежном выражении (метод анализа затрат и выгод), а также моделировать возможные последствия решений с учетом вероятностей их реализации (метод анализа дерева решений), обеспечивая обоснованность управленческих решений в условиях неопределенности These methods make it possible to quantitatively assess the effectiveness of various alternative measures by comparing costs and benefits in monetary terms using cost-benefit analysis. They also make it possible to model the potential consequences of decisions, taking into account the probabilities of their implementation, using decision tree analysis, thereby ensuring the validity of management decisions under conditions of uncertainty.

Введение параметра управляемости C позволяет перевести оценку рисков из плоскости пассивного прогнозирования в плоскость активного управления, что соответствует принципу проактивности стандарта ISO 31000:2018¹⁰, в основе которого лежит заблаговременное выявление и предупреждение рисков, а не реакция на их последствия.

Практическая ценность оценки рисков по трем параметрам (P , I , C) заключается в следующем:

- дифференциация рисков с одинаковым приоритетом: риски со сходным значением $P \times I$ могут кардинально различаться по уровню управляемости, что требует разных стратегий реагирования;
- формирование обоснованных приоритетов для действий: смещение акцента с рисков, имеющих наибольшую тяжесть последствий, но неподконтрольных команде (например, макроэкономические риски), на риски с умеренным влиянием, но высоким потенциалом контроля (например, качество проектной документации), что приводит к более эффективному распределению ограниченных организационных и финансовых ресурсов;
- непосредственная связь оценки с планированием мероприятий: значение параметра C напрямую определяет выбор стратегии обработки риска: от активного устранения (при высокой управляемости) до передачи, смягчения или вынужденного принятия (при низкой управляемости).

Выбор 5-балльных шкал для экспертной оценки вероятности P , влияния I и управляемости C рисков соответствует требованиям международных стандартов в области управления рисками (ISO 31000:2018¹⁰, A Guide to the Project Management Body of Knowledge¹¹ (PMBOK® Guide)), которые для качественного анализа рекомендуют использование шкал с 3–5 градациями. Такой подход повышает точность и контролируемость процесса сбора первичных данных на основе реализации следующих положений:

1. Оптимизация экспертного оценивания. Пятибалльная шкала обеспечивает необходимую смысловую дискретность оценок (очень низкая, низкая, средняя, высокая, очень высокая), оставаясь интуитивно понятной и удобной для применения. Это снижает нагрузку на эксперта и повышает согласованность его суждений.

2. Обеспечение профессиональной совместимости. Формат шкалы интегрируется с общепринятым инструментом визуализации — матрицей вероятности и последствий, что обеспечивает сопоставимость результатов с отраслевыми практиками и наглядность интерпретации для всех категорий стейкхолдеров.

3. Подготовка сведений для аналитической обработки. Балльные оценки формируют массив упорядоченных категориальных данных, что создает осно-

ву для первичной статистической обработки (расчет средних значений, проверка согласованности экспертов) и применения методов многокритериального принятия решений (TOPSIS, MAIRCA). Комплексная обработка является необходимым условием для построения обоснованной интегральной оценки уровня риска.

Таким образом, выбор 5-балльной шкалы обоснован, поскольку он обеспечивает оптимальное соответствие требованиям к удобству и надежности экспертного оценивания, совместимости с международными стандартами и подготовке данных для последующего анализа.

На основании предварительно идентифицированной матрицы рисков разработан структурированный опросник для экспертного анкетирования, включающий пять блоков, каждый из которых решает конкретную задачу в рамках экспертной оценки рисков проекта формирования парковочного пространства в мегаполисе.

Блок I. Общие вопросы. Предназначен для сбора идентификационной информации о респонденте: место работы, должность, стаж в строительной отрасли, контактные сведения. Заполнение осуществляется на добровольной основе. Дополнительно фиксируется заинтересованность в ознакомлении с результатами исследования.

Блок II. Оценка значимости этапов и целевых параметров. Направлен на определение весовых коэффициентов, отражающих приоритетность элементов системы управления проектом. В рамках блока осуществляется последовательное распределение 100 % общей значимости (веса) между четырьмя этапами ЖЦ (планирование, проектирование, строительство, эксплуатация) в зависимости от их влияния на итоговый результат и управляемость проекта, а затем — между четырьмя целевыми параметрами (сроки, стоимость, качество, безопасность и экология) исходя из их критичности для достижения общей эффективности проекта.

Блок III. Оценка вероятности наступления рисков. Содержит перечень идентифицированных рисков, сгруппированных по этапам ЖЦ. Оценка вероятности наступления рисков, влияющих на выполнение проекта формирования парковочного пространства в мегаполисе, осуществляется по 5-балльной шкале с применением критериев оценки (1 — очень низкая, степень вероятности наступления риска менее 10 %; 5 — очень высокая, степень вероятности наступления риска более 70 %).

Блок IV. Оценка степени влияния рисков. Определяет степень негативного воздействия каждого риска на целевые параметры. Оценка производится по 5-балльной шкале, где каждый балл соответствует диапазону отклонений: от незначительного (менее 5 % по срокам, 5–10 % по стоимости) до критического (более 20 % по срокам, более 40 % по стоимости).

¹⁰ ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines.

¹¹ A Guide to the Project Management Body of Knowledge. URL: <https://www.pmi.org/standards/pmbok>

Критерии дифференцированы по параметрам сметной стоимости, сроков и качества.

Блок V. Оценка управляемости рисков. Определяет степень контроля проектной команды над рисками. Оценка осуществляется по 5-балльной шкале: 1 балл — полный внутренний контроль (источник риска в зоне ответственности команды); 5 баллов — контроль отсутствует (внешние макроэкономические, политические или форс-мажорные факторы). Критерии учитывают источник возникновения риска и возможности воздействия проектной команды.

Для обеспечения достоверности и репрезентативности результатов экспертного опроса предполагается сформировать группу, включающую специалистов, обладающих опытом в области управления инвестиционно-строительными проектами, транспортного планирования, проектирования и эксплуатации объектов парковочной инфраструктуры в условиях мегаполиса. Состав экспертной группы предлагается формировать с учетом следующих требований к компетенциям: наличие практического опыта реализации аналогичных проектов, участие в разработке градостроительной документации, экспертизе проектной документации или управлении эксплуатацией парковочных объектов.

Опрос планируется осуществить в заочном формате с использованием онлайн-платформы (например, Google Forms) для обеспечения анонимности, независимости оценок и территориальной доступности. Каждому эксперту будет отправлена ссылка на электронную анкету с подробной инструкцией по заполнению. Статистическая обработка данных экспертного опроса направлена на формирование достоверной аналитической базы для последующего анализа и предполагает проведение в два последовательных этапа: первичное обобщение экспертных оценок — расчет средних значений для каждого параметра риска по группе экспертов; проверка согласованности мнений экспертной группы — вычисление коэффициента конкордации Кендалла W для оценки статистической значимости достигнутого консенсуса. Полученные согласованные оценки вероятности P , влияния I и управляемости C сформируют исходные данные для последующего расчета интегральных показателей рисков.

Таким образом, в рамках решения первой и второй задач исследования определена область управления рисками проектов создания парковочных пространств в мегаполисе, включающая выделение этапов ЖЦ и ключевых целевых параметров, а также обоснован выбор методов количественной и качественной оценки рисков на основе экспертного опроса.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с третьей задачей исследования разработан подход к интегральной оценке рисков проектов формирования парковочных пространств

в мегаполисе, объединяющий результаты предшествующих этапов. Предлагаемый подход основывается на последовательной реализации процедур идентификации рисков, их категоризации (распределении по типам: стратегические, операционные, внешние), количественного определения вероятности, степени влияния и управляемости, а также последующего расчета интегрального показателя уровня риска проекта.

Для перехода от анализа отдельно рассматриваемых рисков к комплексному, многоуровневому анализу итогового риска проекта необходимо привести разрозненные оценки разнородных рисков к единой, сопоставимой форме и на этой основе разработать систему сводных показателей, количественно отражающих совокупное воздействие рисков на целевые параметры проекта для каждого этапа его ЖЦ и проекта в целом. Необходимость разработки такого интегрального подхода обусловлена следующими факторами:

- консолидации данных за счет перехода от частных экспертных оценок к обобщенным показателям на уровне этапов ЖЦ и целевых параметров проекта;
- учета стратегических приоритетов на основе двухуровневой системы взвешивания: по целям с помощью весовых коэффициентов W_k для целевых параметров (сроки, стоимость, качество, безопасность), что переводит локальное влияние риска в сопоставимый показатель его значимости для проекта; по этапам ЖЦ проекта с помощью весовых коэффициентов V_j , отражающих относительную значимость этапов для расчета итогового значения риска проекта.

На основе сформированной типологии рисков и полученных в ходе экспертного опроса количественных оценок вероятности P , влияния I и управляемости C разработана трехуровневая система интегральной оценки, позволяющая проводить анализ рисков на операционном, тактическом и стратегическом уровнях управления проектами формирования парковочных пространств в мегаполисе.

Операционный уровень (инструмент: интегральный показатель риска IRI_{ij}): позволяет рассчитать интегральный показатель для каждого идентифицированного риска R_{ij} , где индекс i обозначает этап ЖЦ (планирование, проектирование, строительство, эксплуатация), а индекс j — порядковый номер риска в рамках соответствующего этапа. Расчет осуществляется с учетом не только его вероятности и влияния, но и управляемости. Это обеспечивает смещение фокуса анализа рисков от статической фиксации уровня риска к количественной оценке возможностей управления ими, формируя основу для разработки целенаправленных мероприятий по снижению рисков.

Тактический уровень (инструмент: сводный уровень риска этапа IRI_{ij}): обеспечивает расчет агрегированного показателя риска для каждого этапа ЖЦ (планирование, проектирование, строительство, эксплуатация). Результат позволяет проводить сравнительную оценку и объективно выявлять наиболее

проблемные этапы проекта для обоснованного распределения ресурсов и управленческого воздействия.

Стратегический уровень (инструмент: матрица рисков целевых параметров): на этом уровне осуществляется консолидация данных по целевым параметрам. Матрица рисков целевых параметров количественно демонстрирует, какая из стратегических целей проекта (сроки, стоимость, качество, безопасность и экология) в наибольшей степени подвержена совокупному негативному воздействию рисков на протяжении всего ЖЦ, что служит основой для стратегической корректировки целей проекта.

Предлагаемый подход к интегральной оценке рисков проектов формирования парковочных пространств в мегаполисе формализован как четырехэтапный процесс последовательной трансформации входных данных в иерархическую систему сводных показателей для управления. Каждый этап реализует детерминированную операцию, обеспечивая поэтапное преобразование частных экспертных оценок в агрегированные показатели. На рисунке представлена общая схема предлагаемого подхода, включающая все четыре этапа и их взаимосвязи.

В рамках подхода формируется иерархическая система показателей, включающая:

- интегральный показатель риска IRI_{ij} — количественная оценка отдельного риска;
- сводный показатель риска этапа $SIRI_j$ — агрегированная оценка риска для каждого этапа ЖЦ;
- итоговый показатель риска проекта $PIRI$ — обобщенная оценка совокупного риска проекта;
- интегральный показатель риска целевого параметра IRI_k — оценка степени воздействия рисков на стратегические цели проекта.

Исходными данными для интегральной оценки рисков проектов формирования парковочных пространств в мегаполисе служат согласованные усредненные экспертные оценки, выраженные в баллах по 5-балльной шкале. Оцениванию подлежат три базовых параметра для каждого идентифицированного риска R_{ij} : вероятность P_{ij} , влияние I_{ij} , управляемость C_{ij} . Таким образом, в рамках предлагаемого подхода осуществляется последовательное преобразование исходного множества частных экспертных оценок в целостную иерархию показателей — от точечной оценки отдельных рисков до интегральной оценки их совокупного влияния на целевые параметры проекта по этапам ЖЦ.

Этап 1. Стандартизация и взвешивание данных. Этот этап направлен на унификацию исходных экспертных оценок влияния рисков и их стратегическое взвешивание. Его целью является преобразование разнородных частных оценок в единый интегральный показатель, обеспечивающий объективное сопоставление и ранжирование рисков по их стратегической значимости для проекта.

Стандартизация (обеспечение сравнимости) заключается в приведении разнородных рисков, отне-

сенных к различным целевым параметрам проекта, к единой системе измерений для устранения исходной несопоставимости экспертных оценок.

Взвешивание, осуществляемое для учета стратегических приоритетов, состоит в присвоении каждому целевому параметру k весового коэффициента W_k , отражающего его относительную значимость, что обеспечивает пропорционально больший вклад в значение итогового показателя для рисков, воздействующих на более приоритетные цели проекта.

Расчет значения показателя стратегически взвешенного влияния на целевые параметры проводится по формуле для каждого риска R_{ij} :

$$G_{ij} = I_{ij} \cdot W_k, \quad (1)$$

где G_{ij} — стратегически взвешенное влияние риска R_{ij} ; I_{ij} — исходная экспертная оценка влияния риска R_{ij} ; W_k — весовой коэффициент целевого параметра k (сроки, стоимость, качество, безопасность), на который направлен риск R_{ij} .

По итогам выполнения данного этапа формируется стандартизированная и сопоставимая совокупность значений стратегического влияния G_{ij} для всех идентифицированных рисков. Этот показатель количественно отражает стратегическую значимость риска с учетом относительной значимости затронутых им целевых параметров проекта k . Гибкость подхода обеспечивается возможностью оперативной корректировки весов W_k в соответствии с изменением стратегических целей.

Этап 2. Расчет значения интегрального показателя риска IRI_{ij} . Второй этап направлен на объединение трех ключевых параметров риска — вероятности P_{ij} , стратегически взвешенного влияния G_{ij} и управляемости C_{ij} в единый количественный показатель. Цель этапа состоит в агрегировании основных параметров риска в единый количественный показатель IRI_{ij} , что позволяет перейти от раздельного анализа его параметров к их комплексной интегральной оценке.

Агрегирование базовых параметров заключается в объединении для каждого идентифицированного риска R_{ij} двух основных параметров — вероятности его наступления P_{ij} и показателя стратегически взвешенного влияния G_{ij} , что формирует промежуточное значение интегрального показателя риска, не учитывающего возможности управления им. На следующем шаге полученное значение корректируется с учетом управляемости риска C_{ij} посредством весового коэффициента K_{ij}^c .

Взвешивание по уровню управляемости реализуется путем умножения промежуточного значения интегрального показателя риска IRI_{ij} на весовой коэффициент управляемости K_{ij}^c , зависящий от уровня управляемости C_{ij} , что обоснованно отражает снижение приоритета рисков с более высоким потенциалом управляемости.

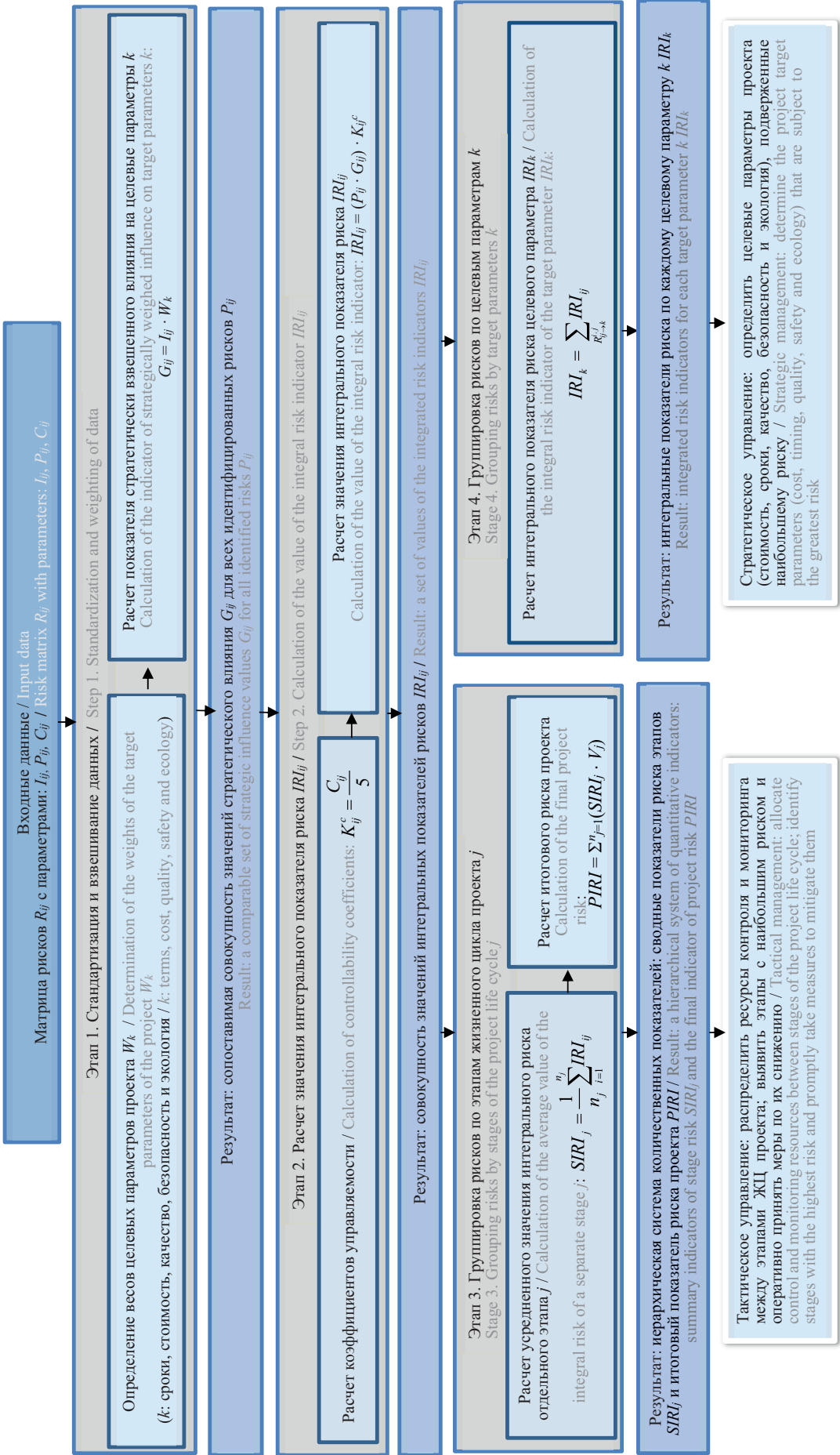


Схема подхода к интегральной оценке рисков проектов формирования парковочных пространств в мегаполисе
Diagram of the integrated risk assessment approach for parking space development projects in a megacity

Значение интегрального показателя риска IRI_{ij} для каждого отдельного риска R_{ij} рассчитывается по формуле:

$$IRI_{ij} = (P_{ij} \cdot G_{ij}) \cdot K_{ij}^c, \quad (2)$$

где весовой коэффициент управляемости K_{ij}^c определяется как:

$$K_{ij}^c = \frac{C_{ij}}{5}. \quad (3)$$

Весовой коэффициент управляемости K_{ij}^c , изменяясь в диапазоне от 0,2 до 1, позволяет скорректировать промежуточную оценку. Чем выше управляемость риска ($C_{ij} \rightarrow 1$), тем ниже значение коэффициента ($K_{ij}^c \rightarrow 0,2$), что существенно снижает итоговый показатель IRI_{ij} и обосновывает более низкий приоритет для управляемых рисков. И наоборот, при низкой управляемости ($C_{ij} \rightarrow 5$) коэффициент приближается к 1, оставляя значение IRI_{ij} практически неизменным, что объективно свидетельствует о необходимости приоритетного внимания к слабо-управляемым рискам.

Итогом реализации второго этапа является получение для каждого риска R_{ij} значения интегрального показателя риска IRI_{ij} , представляющего собой интегрированный количественный показатель, объединяющий оценку вероятности, стратегически взвешенного влияния и управляемости им. Полученная совокупность значений интегральных показателей рисков IRI_{ij} служит непосредственной и объективной основой для сравнительного анализа, ранжирования и последующей типологизации всего множества рисков проекта.

Этап 3. Группировка рисков по этапам жизненного цикла проекта $SIRI_j$. На третьем этапе выполняется переход от анализа отдельных рисков к оценке итогового значения риска отдельного этапа ЖЦ проекта. Цель этапа — агрегация интегральных показателей рисков IRI_{ij} в сводные оценки по этапам ЖЦ проекта $SIRI_j$ для формирования основы принятия тактических решений по распределению ресурсов системы контроля и мониторинга на этапы с наиболее высоким уровнем риска.

Группировка рисков по этапам ЖЦ проекта предусматривает распределение всех идентифицированных рисков R_{ij} по n группам в соответствии с этапом j (планирование, проектирование, строительство, эксплуатация), к которому они содержательно относятся.

Агрегирование рисков на уровне отдельного этапа ЖЦ проекта заключается в консолидации значений интегрального показателя риска IRI_{ij} для всех рисков, относящихся к данному этапу в единый обобщенный показатель $SIRI_j$. Для этого применяется, в частности, метод среднего арифметического, который дает усредненную оценку итогового риска этапа ЖЦ j , обеспечивая тем самым основу для сравнительного анализа различных этапов ЖЦ проекта по уровню рискованности.

Расчет усредненного значения интегрального риска отдельного этапа ЖЦ проекта j производится по формуле:

$$SIRI_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} IRI_{ij}, \quad (4)$$

где n_j — количество рисков на этапе j .

Для получения итогового значения показателя риска проекта в целом $PIRI$ рассчитывается взвешенная сумма итоговых значений показателей риска этапов ЖЦ проекта:

$$PIRI = \sum_{j=1}^n (SIRI_j \cdot V_j), \quad (5)$$

где V_j — весовой коэффициент, отражающий относительную значимость этапа j для общих целей проекта.

Результатом третьего этапа является формирование иерархической системы количественных показателей, включающей: набор сводных показателей каждого отдельного этапа проекта, количественно характеризующих итоговое значение риска каждого отдельного этапа ЖЦ проекта $SIRI_j$; итоговое значение показателя риска проекта $PIRI$, отражающее суммарный риск проекта в целом.

Этап 4. Группировка рисков по целевым параметрам проекта IRI_k . Четвертый этап подхода представляет собой заключительное преобразование данных, в рамках которого осуществляется переход от этапной дифференциации рисков (анализ по этапам ЖЦ) к оценке их воздействия на целевые параметры проекта. Цель этапа — агрегация значений интегральных показателей рисков IRI_{ij} в сводные оценки по целевым параметрам проекта $k(IRI_k)$ для формирования основы принятия стратегических решений, направленных на обеспечение реализации целевых параметров с наивысшей совокупной рискованностью.

Группировка рисков по целевым параметрам проекта заключается в распределении всех идентифицированных рисков R_{ij} в соответствии с тем целевым параметром k (стоимость, сроки, качество, безопасность и экология), на который каждый из них оказывает воздействие.

Агрегирование рисков по целевым параметрам состоит в консолидации значений интегрального показателя риска IRI_{ij} для всех рисков, воздействующих на отдельный целевой параметр k . Результатом является интегральный показатель риска целевого параметра k (IRI_k), количественно выражающий совокупный уровень риска, которому подвержен данный анализ на всех этапах ЖЦ проекта.

Значение интегрального показателя риска целевого параметра k рассчитывается путем суммирования интегральных показателей IRI_{ij} всех связанных с ним рисков:

$$IRI_k = \sum_{R_{ij} \rightarrow k} IRI_{ij}, \quad (6)$$

где $R_{ij} \rightarrow k$ означает, что риск R_{ij} направлен на целевой параметр k .

Результат четвертого этапа — создание матрицы рисков целевых параметров, которая обеспечивает количественное отображение совокупного уровня риска каждой стратегической цели проекта и объективное ранжирование этих целей для определения приоритетов при планировании контрольных мероприятий.

На основе данных третьего и четвертого этапов обеспечивается переход от количественной оценки к принятию обоснованных управленческих решений на тактическом и стратегическом уровнях на основе сформированной иерархической системы показателей.

Разработанный в рамках третьей задачи подход к интегральной оценке рисков проектов формирования парковочных пространств в мегаполисе представляет собой последовательный четырехэтапный процесс, обеспечивающий преобразование исходных экспертных оценок в иерархическую систему количественных показателей. На первом этапе выполнены стандартизация и стратегическое взвешивание исходных экспертных оценок, на втором — расчет интегрального показателя риска IRI_{ij} . Третий этап включает агрегацию рисков по этапам ЖЦ с формированием сводных показателей этапов $SIRI_j$ и итогового риска проекта $PIRI$. На четвертом этапе проводится группировка рисков по целевым параметрам с расчетом интегральных показателей риска целевых параметров IRI_k . Таким образом, предложенный подход создает аналитическую основу для комплексной количественной оценки рисков в проектах формирования парковочных пространств мегаполиса, обеспечивая объективную базу для последующего принятия управленческих решений на тактическом и стратегическом уровнях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящем исследовании достигнута поставленная цель — разработан подход к интегральной оценке рисков проектов формирования парковочных пространств в мегаполисе, что подтверждается решением сформулированных задач.

Основные результаты исследования:

1. Определена область управления рисками проектов образования парковочных пространств в мегаполисе, включающая этапы ЖЦ (планирование, проектирование, строительство, эксплуатация) и ключевые целевые параметры (сроки, стоимость, качество, безопасность и экология). Структурирование объекта управления создало основу для последующей идентификации и количественной оценки рисков.

2. Обоснован выбор методов оценки рисков, адаптированных к специфике строительных и инфраструктурных проектов в условиях высокой неопределенности внешней среды мегаполиса. Сформированная система методов охватывает этапы идентификации (систематизирующие методы, сценарный анализ), анализа (экспертные, полуколичественные, количественные и интеграционные методы), а также оценки допу-

стимости и выбора решений (*ALARP/SAIRP*, анализ затрат и выгод, анализ дерева решений). Приоритет отдан полуколичественным экспертным методам, позволяющим компенсировать отсутствие репрезентативной статистической базы.

3. Разработан четырехэтапный подход к интегральной оценке рисков, представляющий собой последовательное преобразование исходных экспертных оценок в иерархическую систему количественных показателей: стандартизация и стратегическое взвешивание исходных экспертных оценок с учетом весов целевых параметров, формирование показателя стратегически взвешенного влияния; расчет интегрального показателя риска на основе вероятности, взвешенного влияния и управляемости с использованием весового коэффициента; агрегация рисков по этапам ЖЦ, формирование сводных показателей этапов и итогового показателя риска проекта; группировка рисков по целевым параметрам, расчет интегральных показателей риска целевых параметров; переход от количественной оценки к обоснованным управленческим решениям на тактическом и стратегическом уровнях.

В отличие от дискретного анализа отдельных рисков, предложенный подход обеспечивает одновременную агрегацию рисков по этапам ЖЦ и целевым параметрам проекта. Это позволяет дифференцировать управленческие решения: на основе сводных показателей этапов ЖЦ и итогового показателя риска проекта распределять ресурсы контроля между этапами, а на базе интегральных показателей риска целевых параметров определять приоритетные целевые параметры (стоимость, сроки, качество, безопасность и экология) для корректировки стратегии. Предложенный подход обладает гибкостью за счет возможности оперативной корректировки весовых коэффициентов целевых параметров, что позволяет адаптировать оценку к изменению стратегических приоритетов или внешних условий.

Практическая значимость исследования заключается в создании аналитической основы для поддержки управленческих решений в проектах формирования парковочных пространств мегаполиса. Разработанный подход дает возможность: ранжировать риски по уровню значимости для обоснованного планирования мероприятий по их снижению; выявлять этапы ЖЦ с наибольшим уровнем риска для целенаправленного распределения ресурсов; определять целевые параметры, наиболее подверженные рисковому воздействию, для стратегической корректировки приоритетов проекта.

Перспективы дальнейших исследований связаны с апробацией разработанного подхода на конкретных проектах формирования парковочных пространств в мегаполисах, уточнением весовых коэффициентов на основе статистических данных, а также развитием методического аппарата интегральной оценки рисков с учетом динамики изменения факторов неопределенности в процессе реализации проекта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Якимов М.Р., Трофименко Ю.В. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов : монография. 2-е изд. Пермь : Агентство РАДАР, 2022. 536 с. EDN IRPVVJ.
2. Верстина Н.Г., Щепкина Н.Н., Цура В.С. Тенденции обновления городских пространств мегаполисов России в современных условиях // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 4. С. 596–614. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.596-614. EDN AXNUJN.
3. Якимов М.Р. Транспортное планирование. Концепция парковочной политики в городах : монография. М. : Университетская книга, 2019. 96 с. EDN XBJTXW.
4. Корнилов С.Н., Копылова О.А., Фридрихсон О.В., Четвергова А.А. Методика целесообразности размещения и определения параметров парковочных пространств в городской транспортной системе // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 2. С. 92–103. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-92-103. EDN MPQYWS.
5. Wang X., Guo Zh., Hou J., Li T. Optimal allocation of private parking spaces in shared parking systems considering EV charging: A Lagrangian relaxation-based decomposition approach // Computers & Industrial Engineering. 2025. Vol. 205. P. 111170. DOI: 10.1016/j.cie.2025.111170. EDN QVRLNW.
6. Hou J., Guo Z., Li T. An augmented Lagrangian relaxation algorithm for allocation optimization of shared private parking spaces considering EV charging // Expert Systems with Applications. 2026. Vol. 308. P. 131133. DOI: 10.1016/j.eswa.2026.131133
7. Yu K., Zhang Z.-S., Li Y., Sun D. Shared parking space allocation model considering user satisfaction // Transportation Letters. 2026. Pp. 1–24. DOI: 10.1080/19427867.2026.2642864
8. Wang Ya., Zhao Yu., Gan Sh., Li K., Chen Ya., Lai J. Optimization of charging stations integrated with dynamic transportation systems in metropolises // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2023. Vol. 119. P. 103726. DOI: 10.1016/j.trd.2023.103726. EDN RGCPCB.
9. Bhat F.A., Seth Ya., Verma A. Beyond conventional: Analysing the factors affecting the adoption of electric four-wheelers in an Indian metropolis // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2024. Vol. 131. P. 104200. DOI: 10.1016/j.trd.2024.104200. EDN NTUYMD.
10. Gaurav K.K., Baranwal G. Blockchain-driven parking reservation and recommendation system for shared spaces using multi-criteria decision-making with user feedback integration // Computers & Electrical Engineering. 2026. Vol. 129. P. 110771. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2025.110771. EDN APXHNK.
11. Ranjan P., Fakhrmoosavi F., Gurumurthy K.M., Ismael A., Khan N.A. Inference of parking search and location choice behavior using trip trajectories and Bayesian statistics // Case Studies on Transport Policy. 2026. Vol. 23. P. 101671. DOI: 10.1016/j.cstp.2025.101671. EDN IVNPYG.
12. Bowman Cutter W., Franco S.F., Lewis W.S. The topography of regulatory costs: The shadow cost-gradient of parking standards // Journal of Urban Economics. 2026. Vol. 152. P. 103830. DOI: 10.1016/j.jue.2026.103830
13. Su D., Zhao Zh., Zhao K., Liang K., Yu Q. Hierarchical optimal planning and real-time tracking of parking trajectories based on risk field // Control Engineering Practice. 2025. Vol. 163. P. 106423. DOI: 10.1016/j.conengprac.2025.106423. EDN RWGNFX.
14. Tian Y., Xiao H., Xu M. A mean–variance approach for shared parking operations considering the risk of slot matching // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2026. Vol. 185. P. 105567. DOI: 10.1016/j.trc.2026.105567
15. Baumgartner A., Lanzendorf M. Where are parking policies most popular? Empirical findings about the influence of the residential neighbourhood and car parking characteristics on public acceptability // Transport Policy. 2025. Vol. 168. Pp. 263–278. DOI: 10.1016/j.tranpol.2025.04.006. EDN SQESFG.
16. Zhang Z., Gao Y., Zhang F., Liu W. Parking management and operation : a bibliometric analysis and comprehensive review // Transport Economics and Management. 2026. Vol. 4. Pp. 14–37. DOI: 10.1016/j.team.2025.12.001
17. Мамаев Г.И., Бакиров Л.Ю. Проблемы уличных парковок и зарубежный опыт организации парковок // Universum: технические науки. 2022. № 5–4 (98). С. 57–61. DOI: 10.32743/UniTech.2022.98.5.13796. EDN JNDSQX.
18. Li X., Xie B., Wang X., Li G., Yao Z. Parking choice behavior of urban village residents considering parking risk: An integrated modeling approach // Case Studies on Transport Policy. 2024. Vol. 15. P. 101145. DOI: 10.1016/j.cstp.2023.101145. EDN OSBIQW.
19. Shoshany-Tavory S., Bar-Gera H. Pardon me but your e-scooter is in my space: Evaluating the effectiveness of e-scooters parking policies through big data analytics // Case Studies on Transport Policy. 2026. Vol. 23. P. 101707. DOI: 10.1016/j.cstp.2026.101707
20. Moon S.Ah., Shin E.J. Spatial patterns, implementation barriers, and facilitators in Seoul's E-scooter parking corral system: A mixed-methods analysis // Trans-

port Policy. 2025. Vol. 173. P. 103813. DOI: 10.1016/j.tranpol.2025.103813. EDN KOVXUI.

21. Soyinka O., Siu K.W.M., Lawanson T., Adeniji O. Assessing smart infrastructure for sustainable urban development in the Lagos metropolis // Journal of Urban Management. 2016. Vol. 5. Issue 2. Pp. 52–64. DOI: 10.1016/j.jum.2017.01.001

22. Li H. Study on green transportation system of international metropolises // Procedia Engineering. 2016. Vol. 137. Pp. 762–771. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.01.314

23. Духанина Е.В., Хаметова А.Т. Реализация риск-ориентированного подхода в управлении инвестиционно-строительным процессом // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15. № 2. EDN ADCFKU.

24. Габриелян М.О., Третьяков О.Б. Классификация рисков в инвестиционно-строительной деятельности // Вестник университета. 2016. № 5. С. 60–67. EDN WDZQBN.

25. Ряжева Ю.И. Управление рисками проекта : учебное пособие. Самара : Издательство Самарского университета, 2023.

26. Файт Э. Введение в проектное финансирование / пер. с англ. Бюро переводов Ройд. М. : ЗАО Интелбук, 2010. 208 с.

27. Аль-Заиди З.А.К. Исследование влияния факторов риска на деятельность строительных предпри-

ятий : дисс. ... канд. экон. наук. М., 2023. 176 с. EDN WZZBBT.

28. Некрасова М.В., Калошина С.В. Риски участников строительства в условиях экономического кризиса // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2016. Т. 7. № 1. С. 67–73. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.1.09. EDN VPZUWL.

29. Федоров М.В., Матыс Е.Г. Оптимизация рисков взаимодействия участников инвестиционного процесса в строительстве // Вестник Омского университета. Серия «Экономика». 2017. № 1 (57). С. 54–61. DOI: 10.24147/1812-3988.2017.1.54-61. EDN YIJHMI.

30. Логинова М.А. Теоретические аспекты риск-менеджмента инвестиционно-строительной деятельности // Молодежь и наука : сб. мат. VI Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. 2011.

31. Гюльмагомедова Г.А., Курков И.В. Классификация и основные факторы рисков инвестиционного проекта // Прикладные экономические исследования. 2024. № S1. С. 191–195. DOI: 10.47576/2949-1908.2024.55.55.027. EDN APUPQV.

32. Кулик Ю.А., Волович В.Н., Привалов Н.Г., Козловский А.Н. Классификация и качественная оценка рисков инновационных проектов // Записки Горного института. 2012. Т. 197. С. 124–128. EDN QZEQVN.

Поступила в редакцию 17 апреля 2026 г.

Принята в доработанном виде 27 апреля 2026 г.

Одобрена для публикации 26 мая 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Наталья Григорьевна Верстина** — доктор экономических наук, профессор, заведующая кафедрой менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 287560, Scopus: 6506229832, ResearcherID: B-4162-2016, ORCID: 0000-0003-1152-8129; verstinang@mgsu.ru;

Наталья Николаевна Щепкина — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1017109, Scopus: 57208305879, ResearcherID: ABI-3123-2020, ORCID: 0000-0002-3250-6212; schepkinann@mgsu.ru;

Владимир Сергеевич Цура — аспирант, старший преподаватель кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0009-0009-9865-6756; vladimirtsura@yandex.ru.

Вклад авторов:

Верстина Н.Г. — научное руководство, выбор методологии и научное редактирование материалов.

Щепкина Н.Н. — написание введения, итоговых выводов.

Цура В.С. — идея, сбор и обработка материала, написание текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Yakimov M.R., Trofimenko Yu.V. *Transport planning: forming efficient transport systems of large cities*. Perm, RADAR Agency, 2022; 536. EDN IRPVVJ. (rus.).

2. Verstina N.G., Shchepkina N.N., Tsura V.S. Trends of urban renewal in Russian megacities in modern conditions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Con-

- struction and Architecture]. 2025; 20(4):596-614. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.596-614. EDN AXNUJN. (rus.).
3. Yakimov M.R. Transport planning. *Concept of parking policy in cities*. Moscow, University Book, 2019; 96. EDN XBJTXW. (rus.).
4. Kornilov S., Kopylova O., Fridrihson O., Chetvergova A. Feasibility methodology for the placement and parameter definition of parking lots in an urban transport system. *Bulletin of Scientific Research Results*. 2022; 2:92-103. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-92-103. EDN MPQYWS. (rus.).
5. Wang X., Guo Zh., Hou J., Li T. Optimal allocation of private parking spaces in shared parking systems considering EV charging: A Lagrangian relaxation-based decomposition approach. *Computers & Industrial Engineering*. 2025; 205:111170. DOI: 10.1016/j.cie.2025.111170. EDN QVRLNW.
6. Hou J., Guo Z., Li T. An augmented Lagrangian relaxation algorithm for allocation optimization of shared private parking spaces considering EV charging. *Expert Systems with Applications*. 2026; 308:131133. DOI: 10.1016/j.eswa.2026.131133
7. Yu K., Zhang Z.-S., Li Y., Sun D. Shared parking space allocation model considering user satisfaction. *Transportation Letters*. 2026; 1-24. DOI: 10.1080/19427867.2026.2642864
8. Wang Ya., Zhao Yu., Gan Sh., Li K., Chen Ya., Lai J. Optimization of charging stations integrated with dynamic transportation systems in metropolises. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2023; 119:103726. DOI: 10.1016/j.trd.2023.103726. EDN RGCPCB.
9. Bhat F.A., Seth Ya., Verma A. Beyond conventional: Analysing the factors affecting the adoption of electric four-wheelers in an Indian metropolis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2024; 131:104200. DOI: 10.1016/j.trd.2024.104200. EDN NTUYMD.
10. Gaurav K.K., Baranwal G. Blockchain-driven parking reservation and recommendation system for shared spaces using multi-criteria decision-making with user feedback integration. *Computers & Electrical Engineering*. 2026; 129:110771. DOI: 10.1016/j.compeleng.2025.110771. EDN APXHNK.
11. Ranjan P., Fakhrmoosavi F., Gurumurthy K.M., Ismael A., Khan N.A. Inference of parking search and location choice behavior using trip trajectories and Bayesian statistics. *Case Studies on Transport Policy*. 2026; 23:101671. DOI: 10.1016/j.cstp.2025.101671. EDN IVNPG.
12. Bowman Cutter W., Franco S.F., Lewis W.S. The topography of regulatory costs: The shadow cost-gradient of parking standards. *Journal of Urban Economics*. 2026; 152:103830. DOI: 10.1016/j.jue.2026.103830
13. Su D., Zhao Zh., Zhao K., Liang K., Yu Q. Hierarchical optimal planning and real-time tracking of parking trajectories based on risk field. *Control Engineering Practice*. 2025; 163:106423. DOI: 10.1016/j.conengprac.2025.106423. EDN RWGNFX.
14. Tian Y., Xiao H., Xu M. A mean-variance approach for shared parking operations considering the risk of slot matching. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2026; 185:105567. DOI: 10.1016/j.trc.2026.105567
15. Baumgartner A., Lanzendorf M. Where are parking policies most popular? Empirical findings about the influence of the residential neighbourhood and car parking characteristics on public acceptability. *Transport Policy*. 2025; 168:263-278. DOI: 10.1016/j.tranpol.2025.04.006. EDN SQESFG.
16. Zhang Z., Gao Y., Zhang F., Liu W. Parking management and operation: A bibliometric analysis and comprehensive review. *Transport Economics and Management*. 2026; 4:14-37. DOI: 10.1016/j.team.2025.12.001
17. Mamaev G., Bakirov L. Problems of street parking and foreign experience in organizing parking. *Universum: Technical Sciences*. 2022; 5-4(98):57-61. DOI: 10.32743/UniTech.2022.98.5.13796. EDN JNDSQX. (rus.).
18. Li X., Xie B., Wang X., Li G., Yao Z. Parking choice behavior of urban village residents considering parking risk: An integrated modeling approach. *Case Studies on Transport Policy*. 2024; 15:101145. DOI: 10.1016/j.cstp.2023.101145. EDN OSBIQW.
19. Shoshany-Tavory S., Bar-Gera H. Pardon me but your e-scooter is in my space: Evaluating the effectiveness of e-scooters parking policies through big data analytics. *Case Studies on Transport Policy*. 2026; 23:101707. DOI: 10.1016/j.cstp.2026.101707
20. Moon S.Ah., Shin E.J. Spatial patterns, implementation barriers, and facilitators in Seoul's E-scooter parking corral system: A mixed-methods analysis. *Transport Policy*. 2025; 173:103813. DOI: 10.1016/j.tranpol.2025.103813. EDN KOVXUI.
21. Soyinka O., Siu K.W.M., Lawanson T., Adeniji O. Assessing smart infrastructure for sustainable urban development in the Lagos metropolis. *Journal of Urban Management*. 2016; 5(2):52-64. DOI: 10.1016/j.jum.2017.01.001
22. Li H. Study on green transportation system of international metropolises. *Procedia Engineering*. 2016; 137:762-771. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.01.314
23. Dukhanina E.V., Khametova A.T. Implementation of a risk-based approach in the management of the investment and construction process. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(2). EDN ADCFKU. (rus.).
24. Gabrielyan M., Tretyakov O. Classification of risks in investment and construction activities. *Vestnik Universiteta*. 2016; 5:60-67. EDN WDZQBH. (rus.).
25. Ryazheva Yu.I. *Project Risk Management*. Samara, Samara University Publishing House, 2023. (rus.).
26. Fait E. *Introduction to Project Financing*. Moscow, Intelbook JSC, 2010; 208. (rus.).

27. Al-Zaidi Z.A.K. *Study of the Impact of Risk Factors on the Activities of Construction Enterprises*. Moscow, 2023; 176. EDN WZZBBT. (rus.).
28. Nekrasova M.V., Kaloshina S.V. Risks involved in construction during the economic crisis. *Bulletin of Perm State Technical University. Construction and Architecture*. 2016; 7(1):67-73. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.1.09. EDN VPZUWL. (rus.).
29. Fedorov M.V., Matys E.G. Optimization of interaction risks of investment process participants in construction. *Herald of Omsk University. Series: Economics*. 2017; 1(57):54-61. DOI: 10.24147/1812-3988.2017.1.54-61. EDN YIJHMJ. (rus.).
30. Loginova M.A. Theoretical aspects of risk management in investment and construction activities. *Youth and Science : collection of materials from the VI All-Russian scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists*. 2011. (rus.).
31. Gulmagomedova G.A., Kurkov I.V. Classification and main risk factors of an investment project. *Applied Economic Research*. 2024; S1:191-195. DOI: 10.47576/2949-1908.2024.55.55.027. EDN APUPQV. (rus.).
32. Kulik Yu.A., Volovich V.N., Privalov N.G., Kozlovsky A.N. Classification and qualitative assessment of risks of innovation projects. *Journal of Mining Institute*. 2012; 197:124-128. EDN QZEVQH. (rus.).

Received April 17, 2026.

Adopted in revised form on April 27, 2026.

Approved for publication on May 26, 2026.

B I O N O T E S: **Natalia G. Verstina** — Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of the Department of Management and Innovations; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 287560, Scopus: 6506229832, ResearcherID: B-4162-2016, ORCID: 0000-0003-1152-8129; verstinang@mgsu.ru;

Natalia N. Shchepkina — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1017109, Scopus: 57208305879, ResearcherID: ABI-3123-2020, ORCID: 0000-0002-3250-6212; schepkinann@mgsu.ru;

Vladimir S. Tsura — postgraduate student, senior lecturer at the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-9865-6756; vladimirtsura@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Natalia G. Verstina — scientific guidance, methodology selection and scientific editing of materials.

Natalia N. Shchepkina — writing the introduction and final conclusions.

Vladimir S. Tsura — the idea, collection and processing of the material, writing the text of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника). 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:

Артемьева С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В.В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bi o n o t e s: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

Contribution of the authors: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д. / conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, supervision etc.) на английском языке.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

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

0000000000000000000130

ОКТМО

45365000

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 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

0000000000000000000130

ОКТМО

45365000

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 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/>

