

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 20. Выпуск 6
2025**

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

Сквозной номер 199

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 20. Issue 6
2025**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 24-76
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	27.06.2025.
Подписан в свет	30.06.2025.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 21,16. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 202

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

строительный факультет, Республика Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: Алла Русланбековна Табекова

Редактор: Татьяна Владимировна Бердникова

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Дизайн и верстка: Алина Юрьевна Байкова

Перевод на английский язык: Ольга Валерьевна Юденкова

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	27.06.2025

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dmitry V. Kozlov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Executive editor: *Alla R. Tabekova* **Corrector:** *Oksana V. Ermikhina*

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova* **Layout:** *Alina Y. Baykova*

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

А.В. Романенко

Особенности реставрации здания ресторана «Золотой колос» (ВДНХ, Москва) 807

С. Касум, В.Н. Ткачев

Архитектурные аспекты создания центров непрерывного образования в Республике Кот-д’Ивуар 815

И.К. Глушкина

Архитектурно-градостроительные модели портовых кластеров Северного морского пути в условиях Российской Арктики 822

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

П.Г. Романов

Роботизация производства деревянных панельных конструкций и строительства с их применением 839

Н.А. Мишуренко, А.А. Семенов

Вычислительный алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния и устойчивости тонкостенных оболочек 850

А.М. Бударин, О.Ю. Ушаков, Л.С. Сабитов, Л.Р. Маляев, С.С. Сосновских

Методика расчета плит на продавливание, построенная с использованием регрессионного анализа 867

В.А. Пшеничкина, С.Ю. Иванов, С.С. Рекунов, А.А. Чураков

Оценка надежности системы «сооружение – многослойное основание» с учетом жесткости, мощности и конфигурации слоев 888

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

В.А. Токарев, М.Д. Кабалин, М.С. Грищенко, М.А. Высоцкая

Рециклинг вторичного сырья для изготовления мелкоштучных бетонных изделий в дорожном строительстве. Обзор 899

А.А. Талейко, С.В. Леонтьев

Оценка возможности и эффективности использования террикоников Кизеловского угольного бассейна в качестве минеральной добавки в цементных системах 920

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Л.Н. Чернышов, А.Г. Калгушкин

Проблемы эксплуатации малоэтажной жилой застройки и пути их решения 932

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Л.А. Филимонова, Е.Н. Юзе, А.В. Воронин, О.А. Жигунова

Формирование реестра надежности подрядных организаций на основе использования цифровых платформ 941

Л.А. Адамцевич

Управление жизненным циклом жилых зданий и инфраструктурных объектов в проектах комплексного развития территорий 957

Требования к оформлению научной статьи 967

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Andrey V. Romanenko

Features of the restoration of the “Golden Ear” restaurant (VDNH, Moscow) 807

Soro Kasum, Valentin N. Tkachev

Architectural aspects of the creation of continuing education centres in the Republic of Côte d’Ivoire 815

Inga K. Glushkina

**Sustainable development of the Russian Arctic based on port architectural and urban planning clusters
of the northern sea route. 822**

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

Prokopii G. Romanov

Robotization of production of wooden panel structures and construction with their application 839

Nikolai A. Mishurenko, Alexey A. Semenov

**Computational algorithm for calculating the stress-strain state and buckling
of thin-walled shells 850**

Alexander M. Budarin, Oleg Yu. Ushakov, Linar S. Sabitov, Levon R. Mailyan, Sergey S. Sosnovskikh

Regression-based method for calculation of the punching shear capacity of the slab 867

Valeria A. Pshenichkina, Stanislav Yu. Ivanov, Sergey S. Rekunov, Alexey A. Churakov

**Reliability assessment of the system “structure – multilayer foundation” taking into account stiffness, capacity
and configuration of layers 888**

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Vladimir A. Tokarev, Maksim D. Kabalin, Mihail S. Grishchenko, Marina A. Vysotskaya

**Recycling of secondary raw materials for the manufacture of small-piece concrete products
in road construction. Review 899**

Andrei A. Taleiko, Stepan V. Leontev

**Estimation of possibility and efficiency of using coal gangue from Kizel coal basin as a mineral
additive in cement systems 920**

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Leonid N. Chernyshov, Alexey G. Kalguskin

Problems of low-floor housing operation and ways to solve them 932

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Larisa A. Filimonova, Elena N. Yuze, Aleksandr V. Voronin, Olga A. Zhigunova

**Formation of the register of reliability of contractors based on the use of digital
platforms 941**

Liubov A. Adamtsevich

**Life cycle management of residential buildings and infrastructure facilities in projects
of integrated development of territories 957**

Requirements for research paper design 967

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 719:72

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.807-814

Особенности реставрации здания ресторана «Золотой колос» (ВДНХ, Москва)

Андрей Владимирович Романенко

*Индивидуальный предприниматель Романенко А.В. (ИП Романенко А.В.);
г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. В качестве примера рассмотрен объект культурного наследия (ОКН) федерального значения, являющийся одним из главных объектов, формирующих общий вид территории ВДНХ. Основная цель исследования — анализ полученных результатов историко-архитектурных и натурных исследований объекта; данных о состоянии материалов и конструкций здания, полученных при ведении реставрационных работ на объекте в рамках авторского надзора; описание отличий проектных решений от решений, реализованных при строительстве.

Материалы и методы. Исследование проведено на основании работы с архивной информацией и подбора аналогов, а также на изучении непосредственно на ОКН в составе авторского коллектива реставрационной мастерской.

Результаты. Выполнение натурных исследований при производстве работ позволило внести в проект уточняющие архитектурные и конструктивные решения. Это дало возможность дополнить проект реставрации и приспособления, учесть дополнительные объемы материалов при составлении сметной документации.

Выводы. При проведении реставрационных работ важно осуществлять научное руководство, а проектировщикам вести активный авторский надзор, так как на стадии обследования здания не представляется возможным выполнить 100%-ное обследование конструкций зданий. Наличие скрытых дефектов на ОКН явление постоянное. На приведенном в качестве примера объекте выявлены такие дефекты, которые повлияли на принятие проектных решений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: павильон «Золотой Колос», «Главный ресторан», реставрация, приспособление на объекте культурного наследия, ВДНХ

Благодарности. Автор выражает благодарность главному архитектору проекта Л.Р. Абдуллаевой, коллективу проектной мастерской АО «МСУ-1», кто принимал участие в разработке научно-проектной документации, в том числе О.А. Сиразеевой, Е.А. Варнаковой, И.А. Котышевой, В.Е. Жуковой.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Романенко А.В. Особенности реставрации здания ресторана «Золотой колос» (ВДНХ, Москва) // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 6. С. 807–814. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.807-814

Автор, ответственный за переписку: Андрей Владимирович Романенко, 5715277@mail.ru.

Features of the restoration of the “Golden Ear” restaurant (VDNH, Moscow)

Andrey V. Romanenko

*Individual entrepreneur Romanenko A.V.;
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. As an example, an object of cultural heritage of federal significance is considered, which is one of the main objects forming the general appearance of the territory of the VDNH. The main purpose of the study is to analyze the results of historical, architectural and field studies of the facility, as well as to analyze data on the condition of materials and structures of the building obtained during restoration work on the facility under the supervision of the author. Description of the differences between design solutions and solutions implemented during construction.

Materials and methods. The study was conducted on the basis of work with archival information and the selection of analogues, as well as on the basis of research directly at the cultural heritage site as part of the author's team of the restoration workshop.

Results. Conducting field studies during the production of works allowed us to introduce clarifying architectural and constructive solutions into the project. This made it possible to supplement the restoration and adaptation project, to take into account additional volumes of materials when drawing up estimates

Conclusions. When carrying out restoration work, it is extremely important to conduct scientific guidance, as well as for designers to conduct active authorial supervision, as it is not possible to perform a 100 % inspection of building structures at the stage of building inspection. The presence of hidden defects in cultural heritage sites is a constant phenomenon. The following defects were identified on the object given as an example, which affected the decision-making process.

KEYWORDS: pavilion “Golden Ear”, “main restaurant”, restoration, adaptation at the cultural heritage site, VDNH

Acknowledgments. The author expresses gratitude to the chief architect of the project L.R. Abdullaeva, the team of the design workshop of JSC “MSU-1”, that took part in the development of scientific and design documentation, including O.A. Sirazeeva, E.A. Varnakova, I.A. Kotysheva, V.E. Zhukova.

FOR CITATION: Romanenko A.V. Features of the restoration of the “Golden Ear” restaurant (VDNH, Moscow). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(6):807-814. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.807-814 (rus.).

Corresponding author: Andrey V. Romanenko, 5715277@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Павильон «Золотой Колос» (бывший «Главный ресторан») расположен на территории достопримечательного места федерального значения ВСХВ – ВДНХ – ВВЦ. Здание входит в ансамбль выставки и замыкает главную ее ось, проходящую от главного входа через площадь колхозов и площадь механизации. Согласно первому генеральному плану ВСХВ, на берегу Центрального пруда, созданного в середине 1920-х – начале 1930-х гг., предполагалось построить несколько крупных кафе и ресторанов. Возведенное к 1937 г. по проекту Г.Я. Чалтыкьяна здание «Главного ресторана» находилось на одной оси с павильоном «Механизация», от которого шла аллея, обрамленная торговыми и питейными заведениями и киосками. Здание ресторана было одноэтажным, от круглого центрального объема расходились галереи [1, 2].

В связи с аварийным состоянием (в 1941–1949 гг. ресторан не использовался и требовал капитального ремонта) первоначальный деревянный объем был снесен, а на его месте было решено возвести капитальное здание.

Здание главного ресторана «Колос» реконструировано в 1949–1954 гг. В 1954 г. ресторан получил новое название «Золотой колос». Ресторанный комплекс в годы своего расцвета одновременно мог обслуживать до 1000 человек, что причисляло его к крупнейшим ресторанам столицы [3].

В 1970-е гг. ресторан «Золотой колос» пользовался такой популярностью, что на его посещение существовала запись на полгода вперед. Здесь нередко обедали знаменитости и иностранные делегации. За всю историю существования ресторан «Золотой колос» свою первоначальную историческую функцию практически не менял. Исключение составляют постсоветские годы, когда здание ресторана находилось в запустении и не эксплуатировалось. В конце 1980-х гг. ресторан был закрыт на модернизацию. К 1990 г. стройка остановилась. Позже вплоть до 2013–2014 гг. здание ресторана «Золотой колос» использовалось в качестве складского помещения [4–6].

В период 2020–2022 г. проводились комплексные научные исследования на памятнике в рамках разработки проекта реставрации и приспособления. Силами архитектурной мастерской разработана и согласована проектная документация в ФАУ «Главгосэкспертиза России».



Рис. 1. Главный фасад. Процесс реставрационных работ
Fig. 1. The main facade. The process of restoration work

С 2023 г. на объекте начаты реставрационные работы, выполняемые компанией АО «МСУ-1».

Павильон состоит из двух объемов — парадного объема ресторана и технического объема кухни и производственных помещений.

Здание ресторана в основе своей имеет двухзальную композицию, центром которой является вестибюль и портик второго яруса. Оно представляет собой протяженный объем, расположенный вдоль пруда. Главный фасад (рис. 1) украшен открытой галереей со двоянными колоннами и сложным профилированным карнизом. Выступающие ризалиты ограничены парадными открытыми лестницами, которые ведут на второй ярус здания (3-й этаж). Техническая часть здания — одноэтажный разновысотный объем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование памятника было начато с поисков архивных данных (рис. 2–4) как по становлению всего выставочного комплекса, так и рассматриваемого здания. Большое количество информации получено из архивов ВДНХ.



Рис. 2. Общий вид ресторана [1]. Здание ресторана «Золотой колос» в сочетании с водным пространством и соответствующим архитектурным окружением определяло особую среду и создавало атмосферу очень престижного дорогого отдыха

Fig. 2. General view of the restaurant [1]. The building of the “Golden Ear” restaurant, combined with the water space and the corresponding architectural environment, defined a special environment and created a special atmosphere of a very prestigious expensive holiday

В рамках историко-архитектурных исследований проведены работы по 3D-сканированию фасадов здания и поэтажных планов. По облаку точек специалистами простроены все необходимые детали и конструкции здания. Впоследствии эти данные помогли для создания шаблонов для карнизов, гипсовых форм для отливки капителей колонн (рис. 5).

Внешний и внутренний облик здания

Имперская сталинская архитектура, в которой выдержано здание ресторана «Золотой колос», соответствовала своей эпохе. Стиль получил название сталинский ампи́р. Зданий в подобном архитектурном стиле было построено очень много, поэтому у ресторана «Золотой колос» много аналогов.

Основные задачи научных исследований состояли в выявлении первоначального облика здания, изу-



Рис. 4. Общий вид на главный фасад. Фото 1954 г. [1]

Fig. 4. The general view of the main facade. Photo 1954 [1]



Рис. 3. Интерьер банкетного зала (фото из архива) [1]

Fig. 3. The interior of the banquet hall (photo from the archive) [1]

чения его строительной периодизации, декоративно-го оформления фасадов и интерьеров (рис. 6, 7).

Визуальное обследование памятника архитектуры, а также общие библиографические сведения свидетельствуют о том, что большинство современных помещений здания были при постройке открытыми пространствами. При исследовании выявлены поздние закладки и остекления проемов боковых ризалитов.

Отделка фасадов на момент 2020 г. разрушена, на южном фасаде русты сбиты, на наружных лестницах русты утрачены, просматриваются не завершенные штукатурные работы, цоколь со стороны главного фасада облицован гранитом (рис. 8). Полы открытой колоннады выполнены в технике террасцо, полы террасы — из брекчии (более поздняя отделка).

Интерьеры здания отличались богатой отделкой и крупными элементами декора. Четыре больших зеркала заполняли полуциркульные ниши по внутренней продольной стене в каждом из двух банкетных залов (рис. 6, 9). Простенки, наличники дверных проемов, потолки украшены сложным гипсовым декором. Полы в обеденных залах не сохранились. Ранее они были выстланы паркетом. Потолки в боковых крайних объемах (ризалитах) — кессонированные. Протечки кровли локально повредили их. Цилиндрический свод центрального портика в уровне третьего этажа имеет оформление декоративными кессонами и гипсовой лепниной [7–20].

При проведении зондажей обнаружены поздние закладки, что подтвердило наличие окон между центральной открытой галереей и боковыми ризалитами, а также поздние вставки под алюминиевыми окнами в ризалитах.

Исследование кладки колонн на балконе выявило, что колонны выложены во второй строительный период вокруг изначального металлического фонаря, часть которого и обнаружена в процессе зондажей. Кирпичные колонны ограждения входили в предмет охраны данного объекта. Было принято решение по уточнению предмета охраны, что впо-

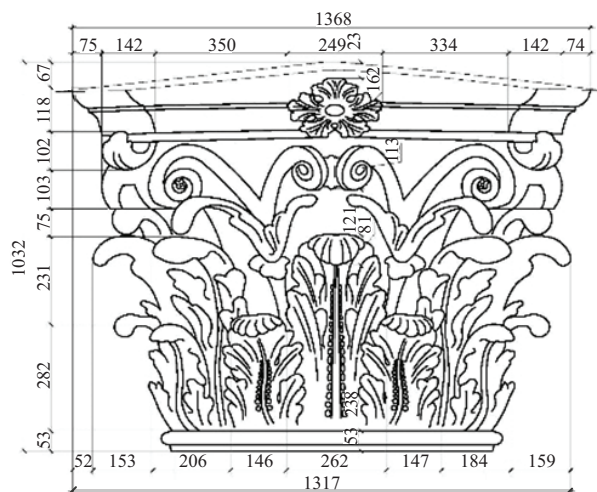


Рис. 5. Капитель колонны

Fig. 5. The capital of the column

следствии помогло при воссоздании главного фасада здания, где воспроизведены светильники балконов и легкий мобильный навес.

Главный вход в здание утратил свое декоративное оформление. После установки лесов в рамках срочных противоаварийных работ продолжились исследования центральной части здания в уровне первого яруса на предмет утраченного декора.



Рис. 6. Интерьер банкетного зала (архивное фото 1953 г.) [2]

Fig. 6. Interior of the banquet hall (archive photo of 1953) [2]

В рамках химико-технологических исследований на внутренних колоннах доказано наличие искусственного мрамора, установлен изначальный цвет помещений банкетных залов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проектом реставрации предлагается воссоздать первоначальный архитектурный облик здания на время его строительства — 1954 г. Реставрируемое здание состоит из двух объемов: парадной части бывшего «Главного ресторана» — объекта культурного наследия федерального значения и одноэтажной технической части, примыкающей со стороны северного фасада, не имеющей охранного статуса.

По результатам исследований определены все оконные и дверные заполнения, структурный состав полов брекчия и террасцо, состав штукатурной отделки фасадов и интерьеров, состав искусственного мрамора. При исследовании штукатурного состава



Рис. 7. Главный фасад ресторана (фото 1954 г.) [2]

Fig. 7. The main facade (photo 1954) [2]



Рис. 8. Главный фасад до начала проектных работ 2020 г. [21]

Fig. 8. The main facade before the start of design work in 2020 [21]



Рис. 9. Интерьер банкетного зала 2020 г. до начала проектных работ

Fig. 9. The interior of the banquet hall in 2020 before the start of design work

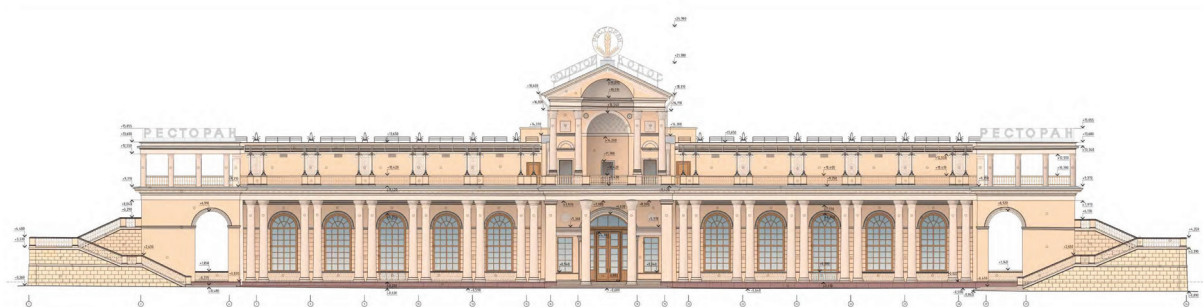


Рис. 10. Главный фасад ресторана. Цветовое решение проекта реставрации

Fig. 10. The main facade of the restaurant. The colour scheme of the restoration project

фасадов найдено 5 слоев покраски. При изучении отделки внутри помещений, в частности под розеткой карниза левого ризалита, зафиксировано 7 отделочных слоев.

На основании подробного изучения состава отделки были подобраны составы для качественной реставрации.

Выполнены точные обмеры декоративных деталей внутренних интерьеров, столярных и дверных заполнений, что позволило изготовить большое количество шаблонов и гипсовых форм для воссоздания поврежденных элементов.

Проведенные архитектурные натурные исследования дали возможность достоверно исследовать конструкции 1954 г. Таким образом, выявлены поздние закладки, отделяющие галереи первого этажа от ризалитов, поздние остекления портиков.

Проектом предусмотрено восстановление первоначального облика второго яруса главного фасада, а именно поздние квадратные кирпичные колонны и деревянная конструкция навеса демонтируются, реставрируются и воссоздаются металлические стойки с бра для навеса. В процессе архитектурных исследований установлено, что стойки световых фонарей и опорных конструкций для навесов сохраня-

ются в кирпичной конструкции квадратных поздних колон (рис. 10) [21].

Открытое пространство ризалитов, боковых портиков, лестниц, ведущих на второй ярус галерей, позволяет беспрепятственно перемещаться по зданию, как и было задумано по проекту А.В. Ефимова. В западном и восточном портиках проектом предусмотрены раскрытие оконных проемов из лестничных клеток и вспомогательных помещений при залах, раскрытие первоначальных габаритов проемов, ведущих в пространство под лестницей. В кессонированных потолках запланированы реставрация и воспроизводство светильников.

В рамках воссоздания внешнего вида памятника принято решение удалить зеленые насаждения перед главным фасадом и близко расположенные деревья к боковым фасадам. Выросшие деревья закрывают архитектуру фасадов, меняют масштаб восприятия здания.

Полы открытых галерей, террас и портиков выполняются в технике терраццо и брекчия. Проектом предусмотрены работы по реставрации полов в вестибюле, боковых ризалитах, портиках и галерее первого яруса; воссозданию полов в технике терраццо в уровне третьего этажа.

На основе проведенных архитектурных натурных и химико-технологических исследований приняты решения по восстановлению цветового решения интерьеров обеденных залов. Разработаны чертежи люстр обеденных залов (по обмерам сохранившихся элементов люстр в фондохранилище ВДНХ), по сохранившимся фотографическим материалам создан рисунок заполнения ниш зеркалами, а также оконные и дверные заполнения залов. Воссоздан деревянный паркет с рисунком «в елочку» в обеденных залах. Инженерные коммуникации были спрятаны в реконструированный подпольный канал.

Интерьеры вестибюля проектом сохраняют свою первоначальную структуру, четыре колонны облицованы искусственным мрамором. На колонны со стен перекинуты балки, декорированные простыми профилями, на балки, в свою очередь, опираются кессонированные декоративные цилиндрические своды, в центральной части потолочного пространства — парусный свод, приходящий на четыре опоры, увенчан кессонированным куполом. Главный вход в вестибюль защищен деревянным тамбуром, филанчатым со стеклом. Деревянные конструкции тамбура отделаны шпоном дуба, покрыты лаком. Наличники проемов из вестибюля в обеденные залы, так же как и колонны, облицованы искусственным мрамором. Для работ по деревянным заполнениям были привлечены узкопрофильные специалисты по реставрации.

Проектом предусмотрено в уровне второго яруса главного фасада воспроизведение светопрозрачной конструкции навеса по конфигурации металлического каркаса 1954 г. вместо тентовых крыш.

Покрытие — светопрозрачная система ETFE (этилентетрафторэтилен) [21], это прозрачный полимерный материал, имеет высокий уровень светопропускания, легкость, гибкость. Автор полагает, что его применение на объекте культурного наследия станет прорывом с точки зрения архитектурного облика здания.

На основании осуществленного инженерно-технического обследования здания разработан комплекс мер для улучшения работы как отдельных конструкций, так и всего здания в целом.

Основными работами с точки зрения конструктивных решений предусмотрены усиление фундаментов на стыке двух разновысотных объемов путем устройства двухсторонней железобетонной обоймы, устройство вертикальной и горизонтальной гидроизоляции. По стенам здания были заложены объемы по вычинке, перекладке кладки, инъектированию цементно-песчаным раствором с косвенным армированием.

На здании сохранились 12-метровые стальные фермы на заклепках. Состояние ферм по данным обследований определено как работоспособное. Под новую нагрузку чердачного перекрытия выпол-

нены работы по усилению части элементов ферм путем приварки дополнительных элементов — уголков.

Все металлические балки перекрытий, которые были скрыты в составе пирога покрытия террас и межэтажных перекрытий, расчищались от ржавчины и покрывались антикоррозийной краской. Состояние каждой балки фиксировалось при проведении авторского надзора на объекте.

Отдельным сложным вопросом для реализации проекта стала разработка узлов крепления навесных карнизных отливок по периметру главного фасада. Без постоянного контроля со стороны авторского надзора оперативная разработка была бы затруднительна. Разработан арматурный каркас, закрепленный на химических анкерах. На него уже подвешивались тяжелые отливки карниза.

По железобетонным элементам (мелкоразмерные бетонные плиты перекрытий) в здании осуществлялась антикоррозийная обработка оголенной арматуры с нанесением ремонтной смеси по железобетонным элементам.

В конце 2023 г. на объекте начались работы по реставрации и приспособлению. В данное время работы продолжают полным ходом. В рамках авторского надзора проводились дополнительные исследования на памятнике. Выполнено большое количество дополнительных вскрытий и зондажей. По банкетным залам удалено 100 % штукатурного слоя, также был выполнен демонтаж штукатурного слоя по фасадам здания. Какие особенности здания были выявлены при начале реставрационных работ? Что обнаружилось после вскрытий?

Было зафиксировано, что из красного полнотелого кирпича выложена только цокольная часть здания, основной массив кладки стены — из силикатного кирпича. Кладка стен произведена с большим количеством нарушений и скрытых дефектов. Перечислим основные из них:

- пустошовная кладка;
- отсутствие перевязки кирпичной кладки в углах стен;
- при кладке стен толщиной 510 мм забутовка выполнена строительным мусором и кирпичным боем. Встречались даже фрагменты одежды;
- кладка арочных перемычек проведена не на всю толщину стены и без выделенного замкового камня, что привело к появлению дополнительных трещин;
- цементная штукатурка по фасадам препятствовала выходу влаги из кладки стен.

Многие вскрытые дефекты относятся к качеству производимых работ. При визуальном осмотре в 2020 г., начале проектных работ, здание представлялось легким с точки зрения усиления конструкций и перечня работ по фасадам. Далее в процессе работ был вскрыт большой фронт не учтенных проектом и сметой работ. Похожие недочеты в строительстве

вскрыты также при проведении реставрационных работ на павильоне 67 «Карелия».

Наибольшие проблемы вызвала силикатная кладка наружных и внутренних стен. Данный материал имеет ограниченный срок эксплуатации [22]. Кирпичная силикатная кладка по наружным стенам здания ресторана в некоторых местах имела трещины на всю высоту стен, причем трещины не переходили на бутобетонный ленточный фундамент. При осуществлении поверочных расчетов по несущей способности кладка выдерживала нагрузку. После проведенного дополнительного анализа результатов обследований специалисты пришли к выводу, что действует одновременно несколько факторов (усталость материалов, многократные циклы замораживания/оттаивания/пустошовная кладка, слабая перевязка наружной и внутренней версты). На основании этих данных приняты решения по устройству внутри кладки стен металлических поясов из швеллеров с последующим обетонированием, инъектированию и расшивке трещин полимерной арматурой.

Среди вновь выявленных дефектов установлено и отсутствие деформационных швов. Этот дефект привел к трещинам по фасадам, полам террас и балкона.

Еще одно из нарушений касательно конструкций — ряд металлических балок (двухавров) в составе перекрытия перегружены кирпичной кладкой, а именно, кирпич был уложен на нижнюю полку двухавра и оштукатурен (для создания поверхности для оштукатуривания). Также зафиксирован кирпичный столб, кладка которого выполнена не из ба-

лок перекрытий, а из железобетонных мелкогабаритных плит 60 мм толщиной, что могло привести к обрушению колонн 3-го этажа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ведущиеся на объекте реставрационные работы по разработанному проекту реставрации и приспособлению, без сомнений, вернут исторический облик и вдохнут новую жизнь в здания. Исследования, которые продолжались в рамках научно-технического сопровождения и надзора, показали, что качество строительных работ, проводимых в 1950-60-х гг., недостаточное. Большинство павильонов на выставке строились как временные здания и сооружения. Скорость возведения зданий сказывается впоследствии на эксплуатации здания и облике. Использование современных ремонтных и реставрационных материалов, а также ведение авторского и технического надзора на памятниках данного периода строительства способны облегчить ремонтно-реставрационные работы. Проектные решения требуют уточнения и корректировки при производстве работ. Заложить в проект 100 % верных решений, по большому опыту работы с объектами культурного наследия, не представляется возможным. В современных реалиях после проведения ремонтно-реставрационных работ следует вносить корректировки и уточнения, и вести процедуру пересогласования проекта в Департаменте культурного наследия Москвы, и проходить повторную государственную экспертизу.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Архив Управления делами ОАО «ВДНХ».
2. Архитектура Москвы 1920–1960. Путеводитель. М., 2006. С. 25–39.
3. Выставочные ансамбли СССР. 1920–1930-е годы: материалы и документы М., 2006. С. 10–54.
4. ГНИМА, колл. V, негатив 12182, 13589, 13588, 1348, колл. VIII, негатив 23930, 23931.
5. Архитектура СССР. 1936 г., № 1; 1937 г., № 2; 1939 г., № 2. С. 32.
6. Бусева-Давыдова И.Л., Нащокина М.В. Архитектурные прогулки по Москве. М., 1996. С. 100.
7. Всесоюзная сельскохозяйственная выставка / под ред. П.Н. Поспелова, А.В. Гриценко, Н.В. Цицина. М., 1939. С. 126–130.
8. Выставка народного хозяйства СССР / под ред. Л.И. Ращупкиной. М., 1984. С. 45.
9. Григорьев А.А. Объекты культурного наследия ВДНХ: 1939–2019. М., 2020. С. 101–105.
10. Гусаков А., Рындин В. От первой всесоюзной до ВДНХ СССР, 1923–1983. М., 1984. С. 20.
11. Жуков А.Ф. Архитектура Всесоюзной выставки 1939 года. М., 1939. С. 36–70.
12. Жуков А.Ф. Архитектура Всесоюзной сельскохозяйственной выставки. М., 1955. С. 56.
13. Зиновьев А.Н. Ансамбль ВСХВ: архитектура и строительство. М., 2014. С. 201–204.
14. Зиновьева О.А. Восьмое чудо света. ВСХВ – ВДНХ – ВВЦ: увлекательные прогулки по главной выставке страны. М., 2013. С. 25.
15. Панкратов В.П. Мечта о прекрасном, несбыточном. Живая история выставки. М., 2021. С. 62–70.
16. Хорст В.В. Отдых и еда на ВДНХ. Архитектурно-гастрономическое путешествие. 1939–1989. М., 2023. С. 45.
17. Зиновьева О.А. Назад в светлое будущее. Ансамбль ВСХВ – ВДНХ – ВВЦ. М., 2013. С. 15–20.
18. Нефедов П.В. Гастроли и трофеи. Выставки Москвы. XX век. М., 2024. С. 14.
19. Москва, которая есть. ВДНХ. М., 2020. С. 20.
20. Научно-проектная документация на ремонтно-реставрационные работы с приспособлением к современному использованию объекта культурного

наследия федерального значения, расположенного на территории ВДНХ: пр-т Мира, д. 119, стр. 284. «Главный фасад ресторана «Золотой колос» (бывший «Главный ресторан»), 1939–1954 гг. Арх. Ефимов А.В. М., 2021.

Поступила в редакцию 14 ноября 2024 г.

Принята в доработанном виде 14 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 14 апреля 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **Андрей Владимирович Романенко** — инженер-конструктор 1-й категории, главный инженер проекта, член Союза реставраторов России; **Индивидуальный предприниматель Романенко А.В. (ИП Романенко А.В.)**; г. Щелково, ул. Комсомольская, д. 16, кв. 26; 5715277@mail.ru.

REFERENCES

1. *Archive of the Management of Affairs of JSC "VDNH"*. (rus.).
2. *Architecture of Moscow 1920–1960. Guidebook*. Moscow, 2006; 25-39. (rus.).
3. *Exhibition ensembles of the USSR. 1920–1930s: materials and documents*. Moscow, 2006; 10-54. (rus.).
4. State Research Museum of Architecture, call. V, negative 12182, 13589, 13588, 1348, call. VIII, negative 23930, 23931.
5. *Architecture of the USSR*. 1936; 1; 1937; 2; 1939; 2:32. (rus.).
6. Buseva-Davydova I.L., Nashchokina M.V. *Architectural walks in Moscow*. Moscow, 1996; 100. (rus.).
7. *All-Union Agricultural Exhibition* / ed. by P.N. Pospelov, A.V. Gritsenko, N.V. Tsitsina. Moscow, 1939; 126-130. (rus.).
8. *Exhibition of the National Economy of the USSR / ed. by L.I. Rashchupkina*. Moscow, 1984; 45. (rus.).
9. Grigoriev A.A. *Objects of cultural heritage of VDNH: 1939–2019*. Moscow, 2020; 101-105. (rus.).
10. Gusakov A., Ryndin V. *From the first All-Union to the VDNKH of the USSR, 1923–1983*. Moscow, 1984; 20 (rus.).
11. Zhukov A.F. *Architecture of the All-Union Exhibition of 1939*. Moscow, 1939; 36-70. (rus.).
12. Zhukov A.F. *Architecture of the All-Union Agricultural Exhibition*. Moscow, 1955; 56. (rus.).
13. Zinoviev A.N. *Ensemble of the All-Union Agricultural Exhibition: Architecture and Construction*. Moscow, 2014; 201-204. (rus.).
14. Zinovieva O.A. *The eighth wonder of the world. VSHV – VDNKh – VVC: fascinating walks through the main exhibition of the country*. Moscow, 2013; 25. (rus.).
15. Pankratov V.P. *A dream of the beautiful, impossible. The living history of the exhibition*. Moscow, 2021; 62-70. (rus.).
16. Horst V.V. *Rest and food at VDNH. An architectural and gastronomic journey. 1939–1989*. Moscow, 2023; 45. (rus.).
17. Zinovieva O.A. *Back to the bright future. Ensemble VSKhV – VDNKh – VVC*. Moscow, 2013; 15-20. (rus.).
18. Nefedov P.V. *Tours and trophies. Exhibitions in Moscow XX century*. Moscow, 2024; 14. (rus.).
19. *Moscow, which is. VDNKH*. Moscow, 2020; 20. (rus.).
20. *Scientific and design documentation for repair and restoration work with adaptation to modern the use of an object of cultural heritage of federal significance located on the territory of VDNH: 119 Mira Ave., p. 284 "The main façade of the restaurant "Zolotoy Kolos" (former "Main restaurant"), 1939–1954*. Arch. Efimov A.V. Moscow, 2021. (rus.).
21. Babkov V.V., Samofeev N.S., Chuikin A.E. Silicate bricks in the exterior walls of buildings: condition analysis, durability forecast and ways to improve it. *Civil Engineering Journal*. 2011; 8(26):35-40. EDN OKILFL. (rus.).

Received November 14, 2024.

Adopted in revised form on April 14, 2025.

Approved for publication on April 14, 2025.

BIONOTES: **Andrey V. Romanenko** — design engineer of the 1st category, chief engineer of the project, member of the Union of Restorers of Russia; **Individual entrepreneur Romanenko A.V.**; 26, 16 Komsomolskaya st., Shchelkovo, Russian Federation; 5715277@mail.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 37.09:72.01

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.815-821

Архитектурные аспекты создания центров непрерывного образования в Республике Кот-д'Ивуар

Соро Касум, Валентин Никитович Ткачев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается тактика ускорения темпов цивилизационного развития Республики Кот-д'Ивуар за счет реализации программы непрерывного образования, локализованной в интегрированных архитектурно-градостроительных комплексах существующих университетов.

Материалы и методы. Концептуальная основа статьи — функциональный и пространственный синтез трехфазной системы обучения: начальной общеобразовательной, профессиональной среднего уровня и высшего уровня, материализуемой комплексным архитектурным решением. Такое объединение планируется провести в Кот-д'Ивуаре впервые. Поэтому исследование ориентировано на поиск и анализ методологии организации непрерывного образования, сложившегося в других странах, и проекцию их опыта на образовательную систему Кот-д'Ивуара.

Результаты. Обобщены социально-экономические и этнические обстоятельства как исторические, так и современные. По материалам, представленным Министерством образования республики, подготовлена предварительная программа организации сети образовательных центров непрерывного обучения (ЦНО), которая сейчас признана ведущей в системе образования и воспитания на всех возрастных уровнях обучаемых во многих странах. Программа учитывает основные параметры и этническую специфику контингента обучаемых, распределение центров на территории страны, исходя из конкретных потребностей общего и профессионального образования. Впервые предлагаются варианты архитектурно-композиционных решений центров, включающих как основные зоны обучения и жилища, так и объекты инфраструктуры, учитывающие локализацию комплексов в структуре городов.

Выводы. Выявлены принципиальные отличия ЦНО от планировочной структуры и архитектурных решений существующих университетских кампусов, но при этом не исключается сходство некоторых структурных элементов, позволяющих взаимно адаптировать эти объекты. Успешность реализации программы создания в Кот-д'Ивуаре центров непрерывного образования позволит перенести опыт в практику соседних стран, испытывающих аналогичные проблемы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: центры непрерывного образования (ЦНО), преемственность обучения, образовательная концепция, программы развития, трудозанятость, функциональное зонирование территории ЦНО, структура генплана

Благодарности. Авторы выражают признательность Посольству Республики Кот-д'Ивуар в Российской Федерации за понимание проблемы и помощь в обеспечении информацией.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Касум С., Ткачев В.Н. Архитектурные аспекты создания центров непрерывного образования в Республике Кот-д'Ивуар // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 6. С. 815–821. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.815-821

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

Architectural aspects of the creation of continuing education centres in the Republic of Côte d'Ivoire

Soro Kasum, Valentin N. Tkachev

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

ABSTRACT

Introduction. The tactics of accelerating the pace of civilizational development of the Republic of Côte d'Ivoire through the implementation of a continuing education programme localized in integrated architectural and urban complexes of existing universities are considered.

Materials and methods. The conceptual basis of the paper is a functional and spatial synthesis of a three — phase learning system: primary general education, vocational secondary level and higher level — materialized by a complex architectural solution. Such an association is planned to be held in Ivory Coast for the first time. Therefore, the study is focused on the search and analysis of the methodology of the organization of continuing education, which has developed in other countries, and the projection of their experience on the educational system of Côte d'Ivoire.

Results. The socio-economic and ethnic circumstances, both historical and modern, are summarized. Based on the materials provided by the Ministry of Education of the Republic, a preliminary programme has been prepared for the organization

of a network of educational centres for continuing education (CCE), which is now recognized as the leading one in the education and upbringing system at all age levels of students in many countries. The programme takes into account the main parameters and ethnic specifics of the contingent of trainees, the distribution of centres in the country, based on the specific needs of general and vocational education. For the first time, variants of architectural and compositional solutions of the centres are proposed, including both the main areas of study and housing, as well as infrastructure facilities that take into account the localization of complexes in the structure of cities.

Conclusions. The fundamental differences between the CCE and the planning structure and architectural solutions of existing university campuses are revealed, but the similarity of some structural elements that allow these objects to be mutually adapted is not excluded. The success of the implementation of the programme for the creation of continuing education centres in Côte d'Ivoire will make it possible to transfer the experience into the practice of neighbouring countries experiencing similar problems.

KEYWORDS: centres of continuing education (CCE), continuity of education, educational concept, development programmes, employment, functional zoning of the territory of the Central Educational Institution, the structure of the general plan

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the Embassy of the Republic of Côte d'Ivoire in the Russian Federation for understanding the problem and assistance in providing information.

FOR CITATION: Kasum S., Tkachev V.N. Architectural aspects of the creation of continuing education centres in the Republic of Côte d'Ivoire. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(6):815-821. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.815-821 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

Подобно соседним странам Экваториальной Африки, Республика Кот-д'Ивуар, которая обрела независимость в 1960 г., быстрыми темпами приобщается к цивилизационному прогрессу. Это сказывается и на приросте населения. За короткое время с 2000 до 2022 г. ее население увеличилось с 15,8 до 28 млн чел.

Стабилизируется экономическое положение страны и благодаря устойчивости политического строя и укреплению международных связей развиваются отрасли народного хозяйства, индустрия, растет культурный и образовательный уровень населения.

Если в недавнем прошлом в стране были грамотны 54 % мужчин и 38 % женщин, то сегодня эти цифры изменились до 47,8 % женщины и 52,2 % мужчин.

Рост общей начальной образованности является необходимым условием становления профессиональной подготовки среднего и высшего уровня.

Для полного охвата населения страны образовательными акциями требуется разработка экспресс-мероприятий, объединяющих образовательной системой молодое поколение страны, наиболее восприимчивое к обучению и овладению профессиональными навыками в новых специальностях. Опыт других стран, оказавшихся в аналогичной ситуации стремительного выхода из первобытного состояния культуры и экономики, показывает, что наиболее оптимальный метод решения проблемы отставания — организация системы непрерывного образования, опирающаяся не только на принципы преемственности в обучении, но и на существующие в народе издавна формы взаимной поддержки, контакта между младшими и старшими учащимися, последовательности обучения, когда прошедшие обучение на начальных стадиях переходят непосредственно к более высокому уровню профессионального обучения среднего звена и затем

с выявлением талантливых выпускников вовлекают их в подготовку специалистов высшего уровня.

Предполагается, что по гендерному составу и возрасту обучаемых образовательные учреждения в таких интегрированных системах должны быть представлены в трех фазах:

- 1) начальной — общеобразовательной, обязательной для всех;
- 2) средней — с обучением в колледжах, школах профессионального образования;
- 3) высшей — с подготовкой специалистов, способных работать в сельском хозяйстве и промышленности, в сфере управления экономикой, в тех отраслях, которые уже развиты, и новых перспективных для страны.

Область подготовки научных кадров пространственно и функционально выпадает из системы интегрированного образования в центрах, которые ориентированы на интернирование обучающихся в жилом секторе центров.

Очевидно, что расположение комплексных по составу центров непрерывного обучения (ЦНО) в городской среде должно учитывать взаимное зонирование территорий образовательного блока, жилища и инфраструктурных элементов, преимущественно системы специального обслуживания, различные линии контактов с городской застройкой, что в целом влияет на компоновку генерального плана, архитектурную стилистику сооружений центра.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сегодня накоплен большой материал для формирования концепций непрерывного образования, выявлены преимущества такой системы подготовки образованных во всех сферах бытия людей перед рассредоточенной, пульсирующей во времени и пространстве, «затухающей» системой образова-

ния, архаичной, но по-прежнему действующей, хотя и поддающейся структурным изменениям. К сожалению, из большого списка изученных источников, близких тематике статьи¹ [1–20], не нашлось таких, которые были бы непосредственно посвящены интегрированным ЦНО. Это и понятно. Развивающиеся страны по инерции принимают образовательные системы, получившие развитие в странах Запада, откуда идут идеи «просветительства». Поэтому даже при общей методологической поддержке интегрированная система ЦНО в Кот-д'Ивуаре строится практически на пустом месте. Концептуально и в реалиях эта система опирается на собственные информационные ресурсы расчетов потребностей в специалистах, деятелях культуры и искусства, выросших в среде интегрированного образования.

Для конкретного представления о реальных потребностях страны в общеобразовательной и профессиональной подготовке населения необходимы сбор и анализ информации о численности контингента, вовлекаемого в систему ЦНО, предусмотреть эволюционные изменения в программировании государственных мероприятий в этой области.

Опорой в исследовании предпосылок полноценной организации этого объемного мероприятия должны стать не одноразовые, а перманентные усилия по комплексному развитию всех аспектов акций, которые концентрируются и контролируются специальным подразделением министерства образования. Параллельно следует осуществлять экспериментальное архитектурное проектирование и строительство объектов.

В завершении настоящего исследования предполагается предварительная программа вариантных решений архитектурно-строительной фазы разработки идеи ЦНО.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Количественный анализ возрастного контингента населения страны должен выявить сочетание общих образовательных принципов со спецификой

обучения, обусловленной различными этническими обычаями и жизненными установками народов, обитающих в Кот-д'Ивуаре, — их около 60 и все имеют традиционные навыки и социальные потребности, и не во всех случаях стоит навязывать им общую образовательную стратегию, необходимо время для «цивилизационного созревания».

Практика других развивающихся стран показывает примерно одинаковое соотношение численности населения, охваченного системой обучения по уровням, начиная с низшего, общеобразовательного: 80–40–15 %. Эти цифры обусловлены взвешенным соотношением численности населения к потребностям в численности образованных людей, в том числе в сфере производства. В Кот-д'Ивуаре ежегодно поступают в университеты почти 100 тыс. студентов (при численности населения около 30 млн чел.). Это естественно требует расширения сети высших учебных заведений с ориентацией части их на включение в систему ЦНО или перерасчета потребностей в специалистах высшего звена. При этом следует также учитывать, что часть выпускников вузов пополняет гуманитарную область специальностей, не включенных в производственную систему.

То есть расчет необходимого объема учащихся и студентов в пространстве обучения должен исходить из базового количества общеобразовательных школ, сообразованного с численностью населения каждого региона, количеством учреждений профессионального обучения, ориентированного на обслуживание сфер народного хозяйства, и реальной численности кадров высшей квалификации с отраслевой специализацией и общеуниверситетской подготовкой.

Уточненная численность трудозанятого населения Кот-д'Ивуара по хозяйственным отраслям, составляющая основу для расчета количества обучаемых в ЦНО, приведена в таблице.

При распределении образовательной сети сферы высшего и среднего профессионального образования, входящего в ЦНО, целесообразно их базировать в наиболее обжитых, плотно заселенных территории

Динамика численности трудозанятого населения и уровня образованности²

Dynamics of the number of employed people and the level of education²

Показатели Indicators	2010	2012	2014
Процентная ставка труда, % Labour interest rate, %	56	65	70
Уровень занятости, % Employment rate, %	72	85	90
Формальный уровень занятости Formal employment level	9	11	18
Общий уровень интеграции выпускников (средний), % The general level of integration of graduates (average), %	17	24	31

¹ Хартия ЮНЕСКО — МСА по архитектурному образованию // Материалы XXV Генеральной ассамблеи. 2011.

² ENSETE, 2013 et calculs des auteurs.

Показатели Indicators	2010	2012	2014
Начальная школа, % Elementary school, %	12	12	17
Средняя школа, % High school, %	21	26	42
Техническое и профессиональное образование и подготовка, % / Technical and vocational education and training, %	23	22	30
Высший профессиональный уровень, % The highest professional level, %	22	48	58

ях, как правило, в крупных городах, располагающих гарантированной возможностью укомплектации новых учебных очагов: Абиджан, Ямусукро, Буаке, Корого, Далоа; Ман, Бондуку, Сан-Педро и др. (рис. 1).

Имея в виду концепцию интеграции образовательной системы, актуальной для Кот-д’Ивуара, целесообразно территориальное объединение образовательных учреждений с тем, чтобы решать одновременно вопросы относительно изолированного обитания и обучения младших учеников от старших, при сохранении возможностей контактов между разными возрастными категориями — процессы воспитания и образования в «общинном» режиме плодотворнее и быстрее.

Таким образом, общая концепция создания интегральной (в образовательном и пространственном смысле) системы ЦНО строится на основе создания объединенных образовательных учреждений, локализованных в регионах, определяемых суммой факторов: плотностью населения, его потенциалами

как объектом обучения, наличием социально-экономической базы для интернизации в общежитиях и кампусах оптимального количества обитаемых всех уровней, наличием и профессиональным уровнем педагогического состава, обеспечением трудоустройства выпускников этого типа образовательных учреждений.

Для начала реальнее всего воспользоваться уже существующими центрами образования, действующими и готовыми к преобразованиям в рамках предлагаемой программы непрерывного обучения для стартовой подстраховки деятельности ЦНО.

Такие центры уже существуют в городах Абиджан, Сан-Педро, Адиаке (на побережье) и Абенгуре, Даукро, Далоа, Ман, Буаке, Бондуку, Одиенне, Корого (в глубине территории), насчитывающие более 100 тыс. чел. с продолжающимся приростом населения.

Очевидно, что в процессе интеграции разновневных школ необходимо решать вопросы функ-



Рис. 1. Карта университетских городов Кот-д’Ивуара

Fig. 1. Map of University Cities in Côte d'Ivoire

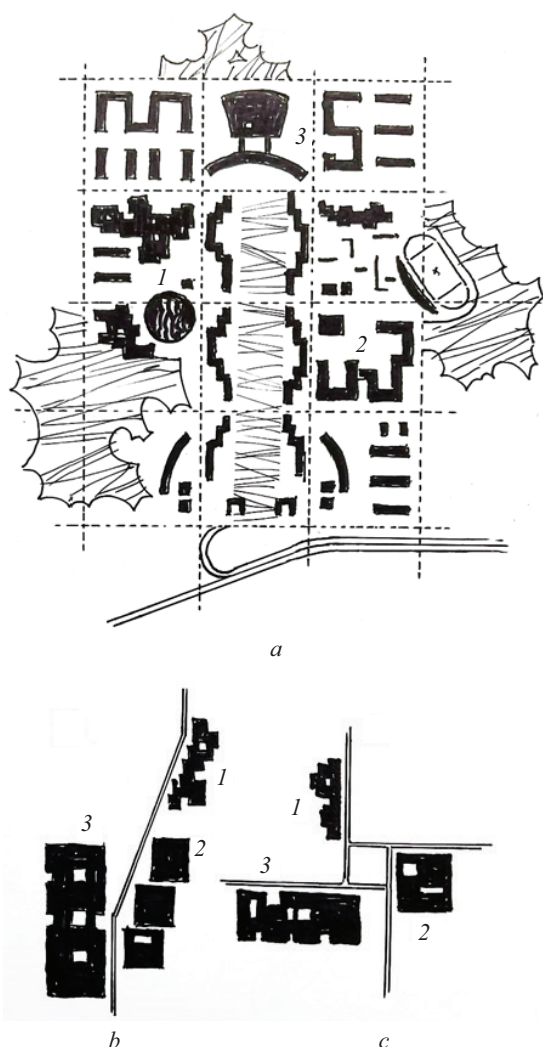


Рис. 2. Варианты зонирования ЦНО в зависимости от форм контакта с городской структурой: *a* — компактный генеральный план; *b, c* — рассредоточенная планировка; *1* — блок начального образования; *2* — среднее учебное заведение; *3* — высшее образовательное звено (рисунки В.Н. Ткачева)

Fig. 2. Zoning options, CCE depending on the forms of contact with the urban structure: *a* — compact master plan; *b, c* — dispersed layout; *1* — primary education block; *2* — secondary educational institution; *3* — higher education (drawing by V.N. Tkachev)

ционального наложения, кооперации как образовательных, так и социальных систем, т.е. разрабатывать урбанистические схемы компоновки зон всех трех

уровней — на основе региональной информации, ориентированной на решение таких синтетических задач.

А для реализации программы создания и локализации ЦНО предусматриваются варианты архитектурно-планировочных решений, учитывающих компактность или рассредоточенность основных зон учебы и жилища, а также распределение зон инфраструктуры: пунктов питания, рекреации, администрации, зрелищных и спортивных объектов и т.д.

Детальные схемы организации генерального плана ЦНО опираются на компоновку ментальной карты функциональных связей планировочных элементов комплекса, учитывающих (условно) географию его расположения относительно плана города (рис. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Центры непрерывного образования структурно и планировочно отличаются от университетских кампусов, их функциональное назначение и состав планировочных элементов (общеобразовательных объектов, комплекса среднего профессионального образования, комплекса высшего профессионального образования) ориентированы на последовательность и преемственность обучения.

Состав ЦНО и распределение их сети по территории страны определяются на основании информации о необходимости и районировании их сообразно емкости по количеству обучаемых, предоставляемой анализом конкретных потребностей и расчетами специализированных подразделений Министерства образования и Министерства труда Кот-д'Ивуара.

Разработка генеральных планов ЦНО и архитектурно-планировочных решений объектов комплексов опираются как на существующий опыт архитектурной организации аналогичных образовательных систем, так и на независимые архитектурные концепции.

Организация и становление практической деятельности ЦНО в Кот-д'Ивуаре имеет существенное значение для ускоренного развития культуры и экономики страны, а также обмена опытом создания подобных образовательных комплексов в соседних странах Экваториальной Африки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Баженова Е.С.* Модернизация архитектурного образования // Аккредитация в образовании. 2014. № 1 (69). С. 35–37. EDN TTTXMH.

2. *Белуосов Н.В.* Непрерывное архитектурно-строительное образование — гарантия устойчивого

развития среды жизнедеятельности // Архитектура и строительство Москвы. 2005. Т. 523. № 5. С. 8–14. EDN KZQYSL.

3. *Жилкина Т.А.* Непрерывное архитектурно-строительное образование как фактор социально-эко-

номического развития общества // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2019. № 11. С. 43–47. DOI: 10.23672/SAE.2019.11.41490. EDN UWJDQX.

4. Зайцева О.В. Непрерывное образование: основные понятия и определения // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2009. № 7 (85). С. 106–109. EDN KWOXQT.

5. Зинченко Г.П. Непрерывное образование — вступление времени. М., 1988. 210 с. EDN VYMMCN.

6. Ильвицкая С.В., Ильина Е.А. Современные концепции архитектурного образования: теория и практика : монография. М. : ГУЗ, 2022.

7. Кияненко К.В. Комментарий к американскому архитектурно-образовательному стандарту (продолжение) // Архитектурный вестник. 2006. № 6. С. 132–137. EDN LBIXPV.

8. Короткова А.С. Архитектурное образование: история и современность // Педагогический журнал. 2022. Т. 12. № 2–1. С. 108–117. DOI: 10.34670/AR.2022.69.57.075. EDN MNEGUA.

9. Кулешов И.В. Современная концепция непрерывного образования. М., 2012.

10. Лукашенко М. Вертикальная интеграция в системе образования // Высшее образование в России. 2002. № 3. С. 10–24. EDN IBKPT.

11. Непрерывное образование: методология, технологии, управление : монография / под ред. Н.А. Лобанова, Л.Г. Титовой, В.В. Юдина. Ярославль, 2018. 298 с. EDN ТЕКНХФ.

12. Никитина Н.П. Архитектурное образование: от истоков до наших дней (современная потребность в инженерно-строительной подготовке архитектора) //

Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2009. № 12. С. 300–302. EDN LTFBWL.

13. Порежковская А.Н. Непрерывное образование: цели, задачи, содержание, функции, перспективы развития // Проблемы и перспективы развития образования : мат. VI Междунар. науч. конф. 2015. С. 38–41. EDN TREJRN.

14. Сергеева С.В., Воскресенко О.А. Концепция развития непрерывного образования в техническом вузе как многоуровневом образовательном комплексе // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 1. С. 1. EDN SBKSDT.

15. Ткачев В.Н. Экспромт на тему проблем образования // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 2–1 (116). С. 66–72. DOI: 10.23670/IRJ.2022.116.2.011. EDN HMVRSK.

16. Ткачев В.Н. Научить архитектуре // Архитектура и строительство России. 2022. № 1 (241). С. 66–73. EDN XFLPHU.

17. Токмовцева М.В. Многоуровневое профессиональное образование в России // Закон. 2006. № 4. С. 34–39. EDN НТНQKP.

18. Филатова Л.О. Преемственность общего и среднего и вузовского образования // Педагогика. 2004. № 8. С. 63–68.

19. Шленов Ю.В., Бетин О.И., Юрьев В.М., Чванова М.С., Астафьева Н.Е. Концепция развития системы непрерывного образования России // Психолого-педагогический журнал Гаудеамус. 2004. Т. 1. № 5. С. 5–22. EDN QZIFPZ.

20. Шленов Ю., Мосичева И., Шестак В. Непрерывное образование в России // Высшее образование в России. 2005. № 3. С. 36–49. EDN IBLTRD.

Поступила в редакцию 28 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 29 марта 2025 г.

Одобрена для публикации 29 марта 2025 г.

О Б АВТОРАХ: **Соро Касум** — аспирант кафедры архитектуры Института архитектуры и градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; kassoums@mail.ru;

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

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Bazhenova E.S. Modernization of architectural education. *Accreditation in Education*. 2014; 1(69):35-37. EDN TTTXMH. (rus.).

2. Belousov N.V. Continuous architectural and construction education — a guarantee of sustainable

development of the living environment. *Architecture and Construction of Moscow*. 2005; 523(5):8-14. EDN KZQYSL. (rus.).

3. Zhilkina T.A. Continuous architectural and construction education as a factor of social and economic de-

- velopment of society. *Humanities, socio-economic and social sciences*. 2019; 11:43-47. DOI: 10.23672/SAE.2019.11.41490. EDN UWJDQX. (rus.).
4. Zaitseva O.V. Continuous education: main definitions and terminology. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*. 2009; 7(85):106-109. EDN KWOXQT. (rus.).
5. Zinchenko G.P. *Continuing education — command of time*. Moscow, 1988; 210. EDN VYMMCN. (rus.).
6. Ilvitskaya S.V., Ilyina E.A. *Modern concepts of architectural education: theory and practice : monograph*. Moscow, GUZ, 2022. (rus.).
7. Kiyanenko K.V. Commentary on the American architectural and educational standard (continued). *Arkhitekturny Vestnik*. 2006; 6:132-137. EDN LBIXPV. (rus.).
8. Korotkova A.S. Architectural education: history and modernity. *Pedagogical Journal*. 2022; 12(2-1): 108-117. DOI: 10.34670/AR.2022.69.57.075. EDN MNEGUA. (rus.).
9. Kuleshov I.V. *Modern concept of lifelong education*. Moscow, 2012. (rus.).
10. Lukashenko M. Vertical integration in the education system. *Higher education in Russia*. 2002; 3:10-24. EDN IBKIIT. (rus.).
11. *Continuous education: methodology, technologies, management: monograph* / ed. by N.A. Lobanov, L.G. Titova, V.V. Yudin. Yaroslavl, 2018; 298. EDN TEKHXF. (rus.).
12. Nikitina N.P. Architectural education: from its origins to the present day (modern need for engineering and construction training of architects). *Actual problems of humanitarian and natural sciences*. 2009; 12:300-302. EDN LTFBWL. (rus.).
13. Porezhkovskaya A.N. Continuous education: goals, objectives, content, functions, development prospects. *Problems and prospects of education development : materials of the VI International scientific conference*. 2015; 38-41. EDN TREJRN. (rus.).
14. Sergeeva S.V., Voskreskasenko O.A. The concept of continuing education development in a technical university as a multilevel educational complex. *Modern Problems of Science and Education*. 2014; 1:1. EDN SBKSDT. (rus.).
15. Tkachev V.N. Impromptu on the topic of education problems. *International Research Journal*. 2022; 2-1(116):66-72. DOI: 10.23670/IRJ.2022.116.2.011. EDN HMVRSK. (rus.).
16. Tkachev V.N. Teach architecture. *Architecture and Construction of Russia*. 2022; 1(241):66-73. EDN XFLEPHU. (rus.).
17. Tokmoltseva M.V. Multilevel professional education in Russia. *Statute*. 2006; 4:34-39. EDN HTHQKP. (rus.).
18. Filatova L.O. Continuity of general, secondary and higher education. *Pedagogy*. 2004; 8:63-68. (rus.).
19. Shlenov Yu.V., Betin O.I., Yuryev V.M., Chvanova M.S., Astafieva N.E. Concept of development of the continuous education system in Russia. *Psychological-Pedagogical Journal "Gaudeamus"*. 2004; 1(5):5-22. EDN QZIFPZ. (rus.).
20. Shlenov Yu., Mosicheva I., Shestak V. Continuous education in Russia. *Higher education in Russia*. 2005; 3:36-49. EDN IBLTRD. (rus.).

Received August 28, 2024.

Adopted in revised form on March 29, 2025.

Approved for publication on March 29, 2025.

B I O N O T E S : **Soro Kasum** — postgraduate student of the Department of Architecture of the Institute of Architecture and Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; kassoums@mail.ru;

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

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

Архитектурно-градостроительные модели портовых кластеров Северного морского пути в условиях Российской Арктики

Инга Константиновна Глушкина

Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (ЦНИИП Минстроя России); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время в соответствии с новой стратегией пространственного развития одним из ключевых национальных приоритетов выступает развитие Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) в целом и развитие, оптимизация структуры портов Северного морского пути (СМП) в частности. Повышение требований к инфраструктурной оснащенности портов СМП, стремительно возрастающий интерес к шельфовым месторождениям стран Арктического совета, а также необходимость социально-экономического развития опорных зон требуют комплексного подхода, в частности, разработки и внедрения трехступенчатой модели развития на долгосрочную перспективу, включающей: мастер-план населенного пункта, архитектурно-градостроительный кластер и типовую архитектурную модель. Цель исследования — выявление особенностей и проблем формирования архитектурной структуры морских портов СМП на новом геополитическом этапе, разработка арктических архитектурных кластеров с опорой на логистическое ядро (морской порт) и построение типовых архитектурных моделей внутри кластера на основании преобладающей типологии.

Материалы и методы. Исследование основано на применении системного и комплексного подходов к проектированию архитектурных объектов морских портов в составе кластеров, аналитическом обзоре документов пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 г. с прогнозом до 2036 г., SWOT-анализе потенциала предлагаемых архитектурно-градостроительных моделей, аналоговом моделировании.

Результаты. Выявлены региональные особенности и проблемы формирования архитектурной структуры морских портов СМП на новом историческом этапе. Разработаны три архитектурно-градостроительные модели арктических кластеров с опорой на порт СМП. Предложены типовые архитектурные модели внутри кластера на основании преобладающей типологии. Проведен SWOT-анализ использования кластерного подхода. Определены слабые и сильные стороны, возможности и угрозы.

Выводы. Обоснована необходимость дополнения новой стратегии развития АЗРФ до 2035 г. в части применения трехступенчатой модели градостроительного развития на долгосрочную перспективу, включающей: мастер-план населенного пункта, архитектурно-градостроительный кластер и типовую архитектурную модель, на основании преобладающей типологии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: архитектурные объекты морских портов, устойчивое развитие, типовая архитектурная модель, логистическое ядро, преобладающая типология, арктические архитектурные кластеры, Северный морской путь, морские порты СМП

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Глушкина И.К. Архитектурно-градостроительные модели портовых кластеров Северного морского пути в условиях Российской Арктики // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 6. С. 822–838. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.822-838

Автор, ответственный за переписку: Инга Константиновна Глушкина, glushkina_inga@mail.ru.

Sustainable development of the Russian Arctic based on port architectural and urban planning clusters of the northern sea route

Inga K. Glushkina

Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Currently, according to the new territorial development strategy, the development of the Russian Arctic in general and the development and optimization of the structure of the ports of the Northern Sea Route (NSR) in particular is one of the most important national priorities. The growing demand for infrastructure equipment for the ports of the Arctic Ocean region, the growing interest in offshore deposits in the Arctic Council countries and the need for socio-economic de-

velopment of the surrounding areas require a comprehensive approach, in particular the development and implementation of a three-stage long-term development model, which includes a master plan for a settlement, an architectural and urban planning group and a standard architectural model. The objective of the study is to identify the characteristics and problems of the design of the architectural structure of the seaports of the North Sea coast in a new geopolitical phase, the development of Arctic architectural clusters based on the logistics core (seaport) and the construction of typical architectural models within the cluster based on the prevailing typology.

Materials and methods. The study is based on the application of a systematic and comprehensive approach to the design of architectural objects of seaports within the framework of clusters, an analytical analysis of documents on the spatial development of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast up to 2036, an SWOT analysis of the potential of the proposed architectural and urban planning models, and analog modeling.

Results. Regional features and problems of forming the architectural structure of NSR seaports at a new historical stage are identified. Three architectural and urban planning models of Arctic clusters based on the port of the Northern Sea Route are developed. Typical architectural models within the cluster are proposed, based on the prevailing typology. A SWOT analysis of the use of the cluster approach is conducted. Weaknesses and strengths, opportunities and threats are determined.

Conclusions. The need to supplement the new Strategy for the development of the Arctic zone of the Russian Federation until 2035 is justified by the application of a three-stage long-term urban development model, which includes: a master plan for a settlement, an architectural and urban development cluster, and a standard architectural model based on the prevailing typology.

KEYWORDS: architectural objects of seaports, sustainable development, typical architectural model, logistics core, dominant typology, Arctic architectural groups, northeast passage, Northern Route Seaports (NSR)

FOR CITATION: Glushkina I.K. Sustainable development of the Russian Arctic based on port architectural and urban planning clusters of the northern sea route. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(6):822-838. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.822-838 (rus.).

Corresponding author: Inga K. Glushkina, glushkina_inga@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Освоение русской Арктики и развитие Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) стоит в первом ряду национальных и государственных приоритетов, что закреплено в новой стратегии пространственного развития¹. Неотъемлемой частью указанной стратегии выступает развитие транспортных коридоров Северного морского пути (СМП), включая расширение, модернизацию и оптимизацию структуры морских портов СМП. Арктический регион — уникальная с точки зрения архитектурно-градостроительного подхода территориальная единица. Ввиду обострившихся геополитических интересов, логистических, экономических, социальных, экологических и других факторов устойчивое развитие территорий требует точечных, мощных и устойчивых на годы решений. В целом концепция устойчивого развития является одной из наиболее актуальных проблем современного мира. В 1992 г. в ходе международной конференции в Рио-де-Жанейро, основанной на выводах комиссии Брундтланд, была официально закреплена идея глобального прогресса, ориентированного на гармоничное сочетание социально-экономического роста и сохранения природных ресурсов. основополагающий принцип этой концепции заключается в удовлетворении текущих потребностей человечества без нанесения ущерба возможностям будущих поколений реализовывать собственные жизненные потребности. На сегодняшний день концепция устойчивого развития стала ключевой

и для АЗРФ. Модернизация инфраструктуры портов, представляющих собой логистическое ядро опорных населенных пунктов, — один из ключевых приоритетных векторов развития СМП, что предметно изложено в Стратегии развития СМП². Решение указанных задач требует комплексности подхода, ориентации на ресурсный потенциал и человекоориентированности.

Повышение требований к инфраструктурной оснащенности портов СМП, стремительно возрастающий интерес к шельфовым месторождениям стран Арктического совета, а также необходимость социально-экономического развития опорных зон требуют комплексного подхода, в частности разработки и внедрения трехступенчатой модели развития на долгосрочную перспективу, включающей мастер-план населенного пункта, архитектурно-градостроительный кластер и типовую архитектурную модель. Проблема формирования модели устойчивого развития и выхода на транснациональный маршрут базируется на комплексе аспектов, учитывая следующие разделы: судостроение, судоремонт, развитие арктических городов и транспортных населенных пунктов вдоль СМП — все это неотъемлемая часть инфраструктуры Северного морского пути. Так как реализация проектов невозможна без человеческого капитала, среда, в том числе и архитектурная, служит важнейшим аспектом.

Данное исследование носит прикладной характер и направлено на выявление особенностей формирования архитектурной структуры портов СМП на современном геополитическом этапе, а также связанных с ними территорий и разработку меро-

¹ Об утверждении Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года : Распоряжение Правительства РФ от 28.12.2024 № 4146-р.

² План развития Северного морского пути до 2035 года : утв. Распоряжением Правительства РФ от 01.08.2022 № 2115-р.

приятный для укрепления и дальнейшего устойчивого развития Арктической зоны РФ. Актуальность исследования обусловлена *необходимостью разработки и внедрения трехступенчатой архитектурно-градостроительной модели пространственного развития на долгосрочную перспективу, которая является ключевой в вопросе устойчивого развития арктических территорий*. Градостроительное регулирование этого вопроса ограничивается разработкой мастер-планов для арктических территорий, в то время как развитие территорий Арктики необходимо рассматривать и проектировать в тесной взаимосвязи с транспортной инфраструктурой СМП, а это требует комплексного подхода и четкой модели перехода от общего мастер-планирования к системе кластеров и архитектурных моделей. В ключе рассматриваемого вопроса также имеют место тенденция к увеличению областей деградации вечномерзлых грунтов и активизация сопряженных с этим опасных геоэкологических явлений, производственная деятельность по освоению минерально-сырьевой базы в пределах морских акваторий и прибрежных зон распределяется диспропорционально, что приводит к дисбалансу между эксплуатацией морских ресурсов и сохранением устойчивости морской и прибрежной экосистем. Зафиксирован тренд к деградации территорий, исчерпавших свой ресурсный потенциал, ввиду отсутствия комплексного плана дальнейшего развития, а также неблагоприятные изменения в демографической обстановке.

Выполняя анализ литературного обзора, следует применять комплексный подход, учитывая обширность направления научного исследования. Поэтому стоит рассмотреть три основных понятия, являющихся основополагающими в данном исследовании: «архитектурные кластеры», «порты Северного морского пути» и понятие «устойчивого развития».

Кластерные подходы, а также внедрение категории и понятия «кластер» в последние десятилетия получили распространение в различных областях научных знаний. Наибольшую актуальность и практическое внедрение «кластеры» получили в сфере экономики, прежде всего благодаря ведущим западным экономистам Р. Бро, В. Руйгроку, Р. Ван-Тюльдеру и М. Портеру. Кластерная теория М. Портера [1] предполагает совместную работу компаний, производительных сил, науки, социума и государственных регуляторов в одной географической локации, взаимодополняющих друг друга для достижения совместных результатов в определенной сфере [2]. В отечественной школе последователями поттеровской кластерной концепции можно считать В.А. Агафонову, занимающегося исследованиями в части кластерной модели организации региональной экономики [3]; Е.А. Монастырного, чьим приоритетом стали инновационные

кластеры развития [4]; В.П. Третьяка, развивающего исследование поттеровских форм кооперации и взаимодополнения в многофункциональных комплексах [5].

Термин «архитектурный кластер» встречается в различных публикациях, посвященных теоретическим и практическим аспектам формирования кластеров в архитектуре и строительстве, гораздо реже, так как носит более узкую направленность. Ниже представлены некоторые из упомянутых публикаций. «Теоретико-методические основы формирования кластера в регионе» — книга О.А. Баулиной и В.В. Ключина [6]. Авторы исследуют теоретические и методические аспекты создания кластеров на региональном уровне, уделяя внимание архитектурным кластерам. В статье «Кластерный подход в проектировании пространственного развития региона» М.В. Симонова, В.А. Елин [7] рассматривают использование кластерного подхода в развитии строительной отрасли региона, объединяющего строительство, промышленность строительных материалов и научно-образовательный комплекс.

В отечественных работах существует значительное количество терминов, предложенных различными авторами, которые по своему значению близки к понятию «архитектурный кластер» или затрагивают смежные области: «кластер МФК» — Е.В. Сазыкина [8] анализирует предмет многофункционального комплекса (МФК) с развитой производственной компонентой; «региональный территориальный кластер» — А.А. Попов, А.Н. Мыреев, В.В. Сергеева, Е. Куценко А. Гашенко, Ю.И. Тарасова [9]; «индустриальный кластер» и «промышленный кластер» — Ю.И. Тарасова, А.В. Киншт; «инновационный кластер» — В.А. Агафонов, М.Ю. Шершева [10]; «территориальный инновационный кластер» — Л.М. Гохберг, А.Е. Шадрин [11]; «рекреационный кластер» — Т.А. Мурашко, М.В. Шубенков, М.Ю. Шубенкова [12]; «минерально-сырьевые кластеры Арктической зоны России» — А.А. Кремнецкий, И.Г. Спиридонов, А.Г. Пилицын, Л.И. Веремева [13]. В целом стоит отметить, что, несмотря на глубокое и всестороннее изучение определений «кластер» и «кластерные системы» в архитектурно-градостроительном поле, в открытых источниках отсутствует информация о понятии «арктический архитектурный кластер».

Изучение вопроса портов СМП отображено в работах многих авторов. И.В. Гурлев, А.А. Макошко, И.Г. Малыгин [14], Н.О. Шевкунова, А.Н. Рахмангулова [15] в своих трудах выполнили анализ состояния и развития транспортной системы СМП и дали прогнозную оценку потенциала морских портов. Полицентричные морские порты-хабы стали ключевыми элементами в научных работах таких авторов, как: И.М. Долинская, Н.Р. Болдин [16], А. Гапочка [17], А.Л. Кузнецов [18], Я.Я. Эглит, А.В. Кириченко [19], Д.С. Скрябин [20], Н. Nam,

D. Song [21], T. Vier [22]. Все рассматриваемые исследования имеют одну общую направленность: авторы совпадают во мнении о необходимости реорганизации структуры портов Северного морского пути, прежние системы неспособны отвечать вызовам нового времени, и именно архитектурно-градостроительная составляющая в планах их развития сможет повысить их конкурентоспособность. Интеграция планов развития портовой инфраструктуры в концепцию формирования трехчастного полицентричного морского порта-хаба создаст условия для внедрения модели, гарантирующей устойчивое функционирование судоходных процессов и комплексное разрешение логистических задач.

Понятие «устойчивое развитие» в условиях современного мира становится все более актуальным. Концептуальное понимание «устойчивого развития»³ уходит корнями в 1980-е гг., когда в рамках ЮНЕП⁴ была создана Международная комиссия по окружающей среде и развитию (МКОСР) [23]. Документ, известный как «Повестка дня XX», представляющий концепцию устойчивого развития общества, был официально утвержден в 1992 г. в рамках форума ООН, посвященного вопросам окружающей среды и развития, проходившего в Рио-де-Жанейро. В его положениях нашли отражение ключевые принципы, касающиеся архитектурной практики и градостроительной политики. В РФ концепция устойчивого развития была официально закреплена в 1994 г.⁵ Основной замысел данной концепции заключался в обеспечении глобального баланса устойчивости без нанесения ущерба способности экосистем поддерживать жизнь в долгосрочной перспективе. Документ включал два ключевых направления деятельности: 1) интеграцию социально-экономического развития с мерами, направленными на охрану и восстановление природной среды, а также рациональное недропользование; 2) поддержку конституционных прав граждан на благоприятную окружающую среду и сохранение природных богатств для будущих поколений. В 1998 г. намечился качественный переход⁶, принятая концепция ставила перед государством задачи социально-экономического роста в гармонии с сохранением экологического равновесия и природно-ресурсного потенциала, обеспечивающего удовлетворение жизненно важных потребностей общества. В рамках этой концепции определялись стратегиче-

ские ориентиры государственной политики во всех сферах общественной деятельности.

В настоящее время общепринятым в отечественной научной практике в части концепции «устойчивого развития» является понимание сбалансированности подходов для решения комплекса задач социального и экономического развития при условии максимального сохранения окружающей среды и природных богатств для следующих поколений. Такое прочтение сформулировано Н.В. Васиной и В.А. Теличевым [24]. Распространение в мире концептуальных подходов «устойчивости» определило обращение человечества к поиску возможностей воплощения ее принципов в самых разных сферах деятельности [25]. Концепция устойчивого развития стала наиболее актуальной для Арктического региона России ввиду географических, геополитических и экологических особенностей. Р.Р. Сарварова и А.Л. Путинцев предлагают схему устойчивого развития Арктической зоны РФ, базирующуюся на равномерном взаимодействии национальной безопасности, экологии, экономики и социального развития [26].

Изучением вопроса устойчивого развития Арктики в области архитектуры и градостроительства занимались многие зарубежные исследователи, в числе которых: А. Soroudi, А. Rizzo, J. Ma [27]. Авторы подчеркивают необходимость учета уникальных региональных особенностей и вовлечения различных заинтересованных сторон для достижения устойчивости в арктических городах. Молодые ученые из Гарвардского университета В. DiNapoli и М. Jull [28] изучают применение стандарта ISO 37120 к арктическим городам и выявляют его недостатки в учете специфических региональных факторов, таких как изменение климата, продовольственная безопасность и культурные практики коренных народов. R. Orttung, O. Anisimov, S. Badina, C. Burns, L. Cho, M. Shaiman, K. Shapovalova, L. Silinsky, E. Zhang, Y. Zhiltcova в своей научной работе [29] выделяют особенности арктических городов, которые позволяют им адаптироваться к изменениям в глобальной окружающей среде и экономике. При этом в ней впервые представлен междисциплинарный сравнительный анализ 46 арктических регионов.

Все рассмотренные научные труды предоставляют ценную информацию о текущих исследованиях и подходах к устойчивому развитию в арктической архитектуре и градостроительстве, и объединены одной целью: обеспечение комплексных решений для развития территорий.

Цель исследования — выявление особенностей и проблем формирования архитектурной структуры морских портов СМП на новом геополитическом этапе, разработка арктических архитектурных кластеров с опорой на логистическое ядро (морской порт) и построение типовых архитектурных моделей внутри кластера на основании преобладающей

³ От англ. sustainable development, также понимаемое как «гармоничное развитие» или «сбалансированное развитие».

⁴ Программа ООН по окружающей среде (англ. UNEP — United Nations Environment Programme).

⁵ О государственной стратегии Российской Федерации по охране окружающей среды и обеспечению устойчивого развития : Указ Президента РФ от 04.02.1994 № 236.

⁶ О Концепции перехода Российской Федерации к устойчивому развитию : Указ Президента РФ от 01.04.1996 № 440.

типологии; разработка архитектурно-градостроительных моделей и приемов формирования архитектурных объектов портовых кластеров СМП в условиях Российской Арктики.

Задачи исследования формируются в рамках следующих системных групп:

1) выявление региональных особенностей, проблем и приоритетных задач создания архитектурной структуры морских портов СМП на новом историческом этапе;

2) разработка архитектурно-градостроительных моделей портовых кластеров СМП;

3) выполнение оценки существующей инфраструктуры СМП и проведение SWOT-анализа внедрения разработанных моделей развития;

4) определение приемов формирования портовых кластеров СМП в условиях Российской Арктики в рамках предлагаемых решений на основании преобладающей типологии для достижения ключевых приоритетов, обозначенных в Стратегии развития АЗРФ до 2035 г.

Объект исследования — существующие инфраструктурные объекты (порты) СМП в пределах АЗРФ и аспекты их архитектурного формирования. Природно-климатические, технологические, антропогенные и психофизиологические факторы рассматриваются в зависимости от степени их влияния при проектировании, строительстве и эксплуатации архитектурных сооружений портов СМП.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование основано на всестороннем изучении архитектурно-градостроительного развития объектов инфраструктуры портовой агломерации СМП в контексте изменения геополитических приоритетов России.

Использованы архивные источники и картографические материалы. Применены комплексный подход; историко-архитектурный и морфологический методы, сравнительный анализ и синтез, методы аналогии и обобщения на стадии сбора и обработки материала. При изучении современного состояния архитектурно-планировочных, градостроительных и социально-экономических аспектов создания архитектурных объектов портовой инфраструктуры Северного морского транспортного коридора (СМТК) применен метод оценки соответствия современным требованиям и тенденциям, проведен ретроспективный обзор объектов.

Графоаналитический метод, абстрагирование, идеализация и метод концептуального прогнозирования использованы при разработке принципов и приемов формирования архитектуры портов и терминалов в полярных регионах градостроительного развития объектов инфраструктуры.

Метод концептуального проектирования применен на стадии проектного предложения архитек-

турных объектов транспортной инфраструктуры логистического кластера СМП.

Исследование базируется на применении системного и комплексного подходов к проектированию архитектурных объектов морских портов в составе кластеров, аналитическом обзоре документов пространственного развития России до 2030 г. с прогнозом до 2036 г., SWOT-анализе потенциала предлагаемых архитектурно-градостроительных моделей, аналоговом моделировании. Разработаны рекомендации и мероприятия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Развитие национального приоритета в Арктической зоне в условиях обостряющейся глобальной конкуренции приобретает важнейшее экономическое, логистическое, транспортное значение⁷. Арктический регион представляет собой стратегически значимую область национальных интересов РФ, охватывающую широкий спектр геополитических, экономических, оборонных, социальных и иных аспектов. Приоритетные национальные интересы России в Арктике зафиксированы в стратегии развития АЗРФ⁸. Документ предусматривает комплекс мер, направленных на интенсификацию экономического роста и социального развития данного макрорегиона. Ключевым элементом транспортной инфраструктуры Арктики является Северный морской путь, который выступает стратегической магистралью, обеспечивающей соединение северо-европейских государств с азиатскими странами, а также интеграцию российской Арктической зоны с Дальним Востоком. В этих условиях выработка планов по устойчивому развитию российской Арктики с опорой на порты СМП представляется одной из важнейших архитектурно-градостроительных задач настоящего времени. Арктика — главный геополитический и геоэкономический полюс сегодняшнего и завтрашнего дня, интерес к региону во всем мире беспрецедентный⁹. Арктический регион приобретает статус зоны стратегических возможностей для государства. В условиях трансформации традиционных технологических процессов и активного вовлечения в крупномасштабные арктические инициативы перед отечественными предприятиями и творческими специалистами открываются новые

⁷ Из выступления Президента Российской Федерации В.В. Путина на церемонии спуска на воду атомного подводного крейсера «Пермь». 27 марта 2025 г. г. Мурманск. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/76556>

⁸ Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года : утв. Указом Президента Российской Федерации 26.10.2020 № 645.

⁹ Пресс-релиз Международного арктического форума МАФ 2025, 27 марта 2025 г. // Газета.Ру. URL: <https://www.gazeta.ru/gazeta/adv/20781488.shtml>

горизонты. Развитие СМП как ключевой транспортной магистрали Арктики, а также создание новых железнодорожных маршрутов, ведущих к северным портам, станут мощным драйвером экономического роста, способствуя комплексному развитию страны.

На сегодняшний день государственные концепции развития АЗРФ претерпели ряд этапов трансформации, что представляет собой значимый аспект их исследовательской оценки. Возникла потребность пересмотра Стратегии АЗРФ, вызванная двумя главными факторами:

1) необходимостью учета актуальных вызовов и возможностей в мире (рост геополитической напряженности, политической конкуренции и военной активности в Арктике; корректировка прогнозов развития ключевых инвестиционных проектов; завершение реализации первого этапа стратегии);

2) необходимостью синхронизации всех стратегических документов АЗРФ (основы госполитики в АЗРФ; стратегия пространственного развития РФ; план развития СМП; национальные проекты; мастер-планы развития городов).

Анализ накопленного опыта показывает, что формирование и обновление документов территориального планирования, регламентов землепользования и застройки, концептуальных мастер-планов, а также разработка обоснований проектных решений опираются на ключевые градостроительные принципы, ориентированные на устранение существующих проблем и реализацию стратегических задач пространственного развития.

Рассмотрим основные характеристики и региональные особенности развития архитектурно-градостроительного сегмента в Арктическом регионе, базирующиеся на двух основных направлениях:

1) развитие СМТК;
2) развитие опорных портов и населенных пунктов.

Формирование иерархизированной системы опорных транспортных узлов, дифференцированных по выполняемым функциям (сервисные узлы, перегрузочные узлы, концентрационные хабы и др.), и развитие межрегиональных транспортных артерий, способствующих интеграции СМП с внутренними логистическими маршрутами, — все вместе важные задачи градостроительного проектирования. Развитие СМТК ориентировано на создание устойчивой инфраструктуры, обеспечивающей бесперебойное движение грузопотоков в условиях сурового климата. При проектировании портовых и транспортных узлов следует учитывать их сопряжение с действующими коммуникационными сетями и стратегические приоритеты социально-экономического роста арктических территорий. Эффективное функционирование СМТК требует создания многоуровневой системы узловых объектов, включающей международные транспортные узлы, портово-промышленные комплексы специ-

ализированного назначения, логистические центры и инфраструктуру, обеспечивающую судоходство. Проектирование данной системы базируется на концепции адаптивного освоения территории, предполагающей компактное размещение объектов, минимизацию антропогенного воздействия на экосистемы и естественное природное окружение, использование энергосберегающих технологий и применение модульных конструктивных решений, позволяющих оперативно расширять инфраструктурную сеть.

Вектор развития опорных пунктов Арктической зоны России базируется, в первую очередь, на их специализации и экономико-географических преимуществах. Опорные зоны необходимо рассматривать с точки зрения взаимодействия с морскими портами и терминалами СМП, а формирование основных моделей взаимодействия для каждой опорной зоны должно происходить по следующим параметрам:

- 1) транспорт;
- 2) ресурсы;
- 3) население;
- 4) инфраструктура СМП.

Далее предлагается рассмотреть 8 опорных зон Арктики с выявлением ключевых особенностей.

Кольская опорная зона. Экономико-географические преимущества региона обусловлены его выгодным транзитным положением, непосредственной близостью к крупному потребительскому центру Санкт-Петербургской агломерации, а также наличием протяженной государственной границы с Финляндией, входящей в состав Европейского Союза, что сопровождается развитой инфраструктурой приграничного сотрудничества. Дополнительными факторами стратегической значимости являются выход к акваториям Северного Ледовитого и Атлантического океанов, а также доступ к СМП. Портовые и инфраструктурные возможности Мурманской области предназначены для освоения и эксплуатации нефтегазовых месторождений арктического шельфа, таких как «Приразломное» и «Штокмановское».

В Карелии сосредоточены значительные запасы цветных и редких металлов, обладающих промышленным потенциалом. Несмотря на отсутствие месторождений углеводородного сырья, регион выделяется среди субъектов Арктической зоны РФ значительной лесной площадью, составляющей 14,9 млн га, из которых 0,367 млн га относятся к категории лесных насаждений. Ключевым логистическим узлом выступает Мурманский морской порт, являющийся крупнейшим незамерзающим портом АЗРФ. Порт Мурманск — отправная точка маршрутов СМП, порт-хаб и порт базирования российского ледокольного флота. Также Мурманск — важный пункт перевалки добываемых полезных ископаемых. Мурманск соединен с железнодорожной сетью России.

Архангельская опорная зона характеризуется перевалкой грузов и продукции лесной промышленности для внутреннего потребления и экспорта. Глубоководный порт Архангельск обслуживает грузопотоки западного сектора Российской Арктики и является опорным портом СМП. Одними из ключевых аспектов функционирования особой зоны служат: научно-образовательный — здесь сосредоточены высшие учебные заведения с профильной северной и арктической спецификой. В Архангельской опорной зоне как на материке, так и на островных территориях расположены оборонные и стратегические объекты, а также предприятия оборонно-промышленного комплекса. Архангельская опорная зона обладает значительным культурно-историческим наследием и большим туристским потенциалом. Логистическое ядро — порт Архангельск.

Ненецкая опорная зона характеризуется высоким минерально-сырьевым потенциалом. Ключевое значение имеют поддержка и обеспечение разработки шельфовых месторождений углеводородного сырья в Баренцевом и Карском морях и месторождений Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Логистическое ядро — глубоководный порт Индига — обладает потенциалом функционировать в роли узлового логистического центра, обеспечивающего перегрузку международных транзитных грузопотоков с фидерных маршрутов на арктические судовые линии, что способствует их дальнейшему перемещению по СМП в направлении Европа – Азия – Европа [30].

Воркутинская опорная зона фокусируется на обеспечении разработки угольных месторождений Печерского угольного бассейна и добычи углеводородного сырья Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Логистическое ядро — порт Арктур на берегу Карского моря.

Ямало-Ненецкая опорная зона обслуживает крупнейшие газовые месторождения: Бованенковское, Харасавэйское и Круzensхтерское. Логистическое ядро — морской порт Сабетта — одна из важнейших опорных точек СМП.

Таймыро-Туруханская опорная зона обладает значительными запасами углеводородов, угля и руд. Особенность освоения выявленных угольных, нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений заключается в их высокой концентрации на относительно компактной территории, прилегающей к портам Диксон, Дудинка и Игарка. Минеральные ископаемые доставляются для отгрузки через порты СМП и вглубь территорий Красноярского края по Енисею. Региональными планами развития¹⁰

предусмотрено дальнейшее освоение минерально-сырьевой базы, а также поддержка коренных малочисленных народов Севера, сохранивших традиционный уклад жизни и уникальную культуру.

Северо-Якутская опорная зона будет развиваться за счет реализации инвестиционных проектов в области разработки месторождений углеводородного сырья как на континентальном шельфе, так и в материковой части Арктического региона Якутии. Наряду с этим приоритетным направлением остается добыча твердых полезных ископаемых, включая крупные и уникальные залежи алмазов, золота, цветных и редкоземельных металлов, а также олова. Логистическое ядро — порт Тикси.

Чукотская опорная зона сформирована на основе месторождений углеводородного минерального сырья и драгметаллов. Транспортно-географическое положение определяет развитие Чукотской опорной зоны для обеспечения безопасного судоходства по СМП и обслуживания судов и навигации. Логистический узел — порт Певек.

В современных стратегических инициативах и концептуальных разработках, что следует из вышеприведенного анализа пространственного развития опорных зон, преобладает ориентированность на ресурсно-сырьевой подход. В данном контексте ключевым фактором развития выступает добыча углеводородного сырья, рассматриваемая в качестве основного механизма стимулирования экономического роста страны [31]. Дальнейшая интенсификация освоения минерально-сырьевой базы будет частично способствовать развитию территорий, при этом необходимо рассматривать комплексные факторы такого развития, обеспечивая не только рост добычи ресурсов, но и формирование локальных производственных комплексов и развитие социальной сферы для обеспечения комфортных условий жизни населения [32].

Развитие АЗРФ, по мнению специалистов, требует применения передовой стратегии освоения региона, основанной на программно-целевом методе. Этот подход предусматривает целостное освоение ресурсного потенциала территории с акцентом на использование высокотехнологичных и экологически безопасных решений, что способствует сохранению комфортных условий проживания, особенно для коренных малочисленных народов Севера (КМНС). Предлагаемая концепция ориентирована на гармоничное и многогранное развитие арктического пространства, включающее не только энергетическую и сырьевую отрасли, но и иные ключевые сферы общественной жизни. В ее основе заложены принципы социально-экономического развития, интегрированные в общегосударственную стратегию и сопровождаемые четко обозначенными задачами, направленными на достижение поставленных ориентиров. Особое внимание уделяется решению

¹⁰ Стратегия социально-экономического развития Таймырского Долгано-Ненецкого муниципального района до 2030 г. : утв. решением Таймырского Долгано-Ненецкого районного Совета депутатов от 14.02.2019 № 03-034.

актуальных экономических и социальных вызовов, что является залогом стабильного развития региона.

В ходе анализа документации автором было установлено, что на данном этапе отсутствует синхронизация всех стратегических документов АЗРФ, архитектурно-градостроительная составляющая учитывается в недостаточной степени и приоритетное внимание уделяется развитию ресурсных проектов. В существующих документах, в том числе и мастер-планах территории, отражены общие тенденции развития территорий, в то время как комплексное развитие требует разработки и утверждения модели на долгосрочную перспективу. В связи с чем, как представляется, существует необходимость дополнения к материалам имеющейся стратегии развития АЗРФ до 2035 г. В частности, трехступенчатой модели градостроительного развития на долгосрочную перспективу, включающей: мастер-план населенного пункта, архитектурно-градостроительный кластер и типовую архитектурную модель на основании преобладающей типологии (рис. 1).

Экспертное сообщество подчеркивает значимость соблюдения равновесия между реализацией крупных инфраструктурных проектов и принципами устойчивого развития. В этом контексте ключевой задачей комплексного освоения Арктической зоны РФ является ее эволюция в качестве пространства, функционирующего на принципах устойчивого развития. Для этого необходимо разработать архитектурно-градостроительные модели, отвечающие запросам и потребностям каждой из зон АЗРФ.

Исходя из обозначенных в стратегиях направленностей, а также идеи развития каркасов зон АЗРФ (транспортного, энергетического и социаль-

ного), автор предлагает следующие архитектурно-градостроительные модели:

- наукоемкая;
- логистическая;
- ресурсно-сырьевая.

Для каждой из обозначенных моделей, ядром которых в каждом отдельном случае служит порт СМП, выполнено построение архитектурных объемов ключевых зданий функциональной направленности на основании типологии, преобладающей в той или иной концепции. В числе прочего, помимо общих климатических факторов, учтено территориальное размещение, что повлияло на способ предполагаемого возведения объемов. Так, для Норильска и Дудинки может быть использовано строительство посредством применения железобетонных конструкций. В то время как для Тикси и Певек могут быть использованы исключительно модули ввиду территориального расположения и климатических особенностей. На основании данных, рассмотренных выше в статье стратегических документов, можно сделать следующие обобщающие выводы и сгруппировать признаки и особенности регионов АЗРФ (рис. 2):

- европейская часть АЗРФ опережает остальные регионы в развитии урбанистики, архитектуры, транспорта, промышленности, инфраструктуры и энергетики;
- Ямало-Ненецкий АО лидирует в промышленном производстве и добыче ресурсов в Западно-Сибирском регионе;
- Сибирь и Дальний Восток охватывают 85 % площади АЗРФ, тогда как европейский сегмент — лишь 15 %;

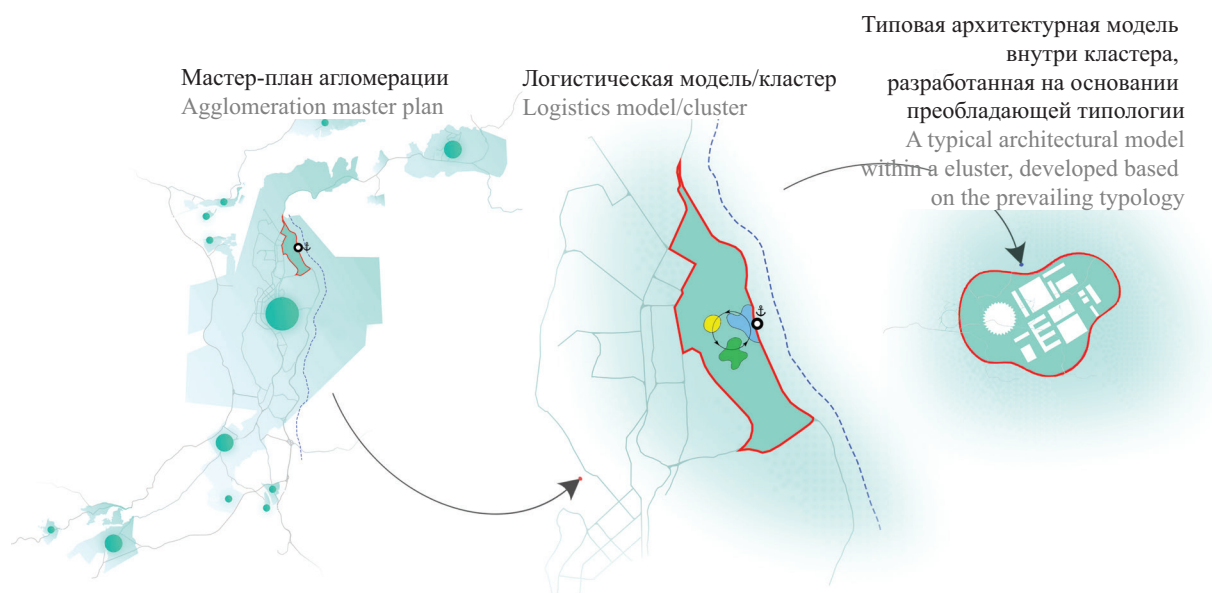


Рис. 1. Модель развития Арктической зоны Российской Федерации на долгосрочную перспективу (разработала И.К. Глушкина)

Fig. 1. Long-term development model of the Arctic zone of the Russian Federation (developed by I.K. Glushkina)

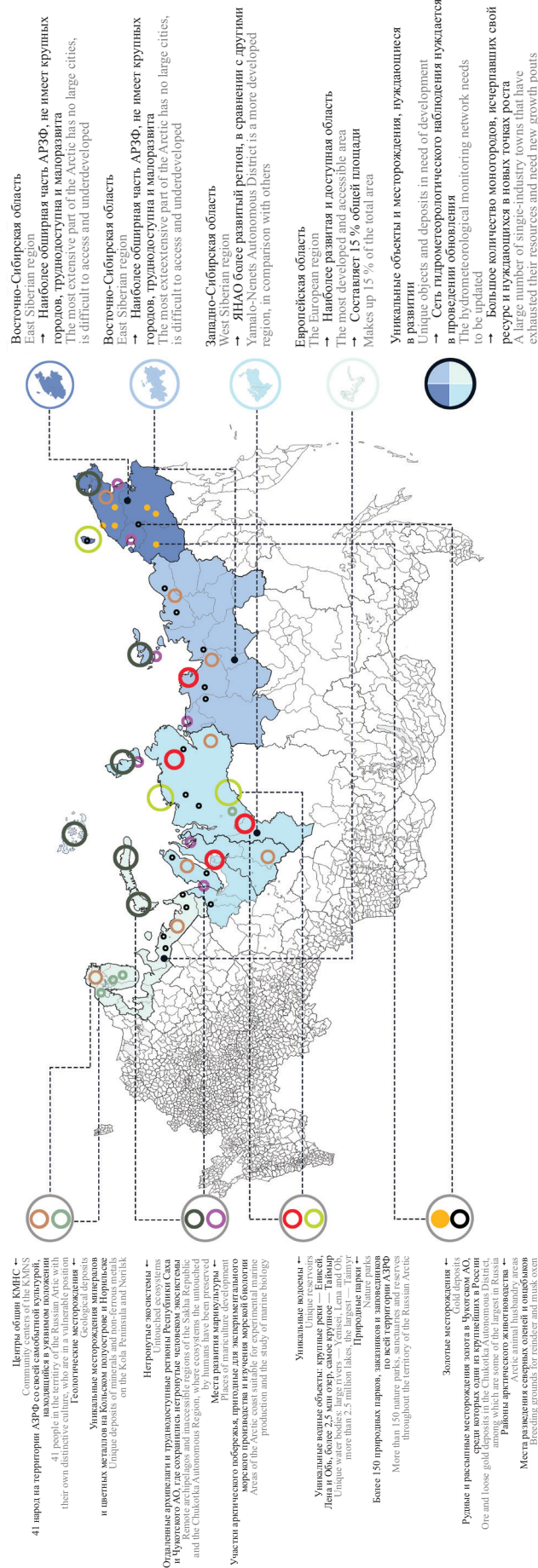


Рис. 2. Особенности регионов Арктической зоны Российской Федерации (разработала И.К. Глушкина)
 Fig. 2. Features of the regions of the Russian Arctic (developed by I.K. Glushkina)

- геополитический дисбаланс: развитые и доступные районы занимают малую часть АЗРФ, тогда как обширная азиатская территория остается слабо освоенной и труднодоступной;

- ключевые ресурсные зоны: месторождения Кольского полуострова, центры рыбоводства в Карелии, природные заповедники и традиционные промыслы в Сибири, нефтегазоносные провинции Ямало-Ненецкого автономного округа и Ненецкого автономного округа, золотодобывающие районы Чукотки;

- гидрометеорологическая сеть АЗРФ редка и устарела, ее модернизация необходима для судоходства по Севморпути;

- моногорода АЗРФ переживают упадок, требуют экономической переориентации и создания новых точек роста;

- восточно-арктические порты, построенные в 1940–1950-х гг., изношены, а судоходство в этом секторе затруднено из-за тяжелых ледовых условий;

- транспортная система Западной и Центральной Арктики представлена автомобильными и железными дорогами, портами, аэропортами и трубопроводами.

Наукоемкая модель развития АЗРФ

Продвижение концепции устойчивого развития невозможно без прочного научного фундамента. В этом контексте специалисты особо выделяют необходимость углубленного научного изучения Арктической зоны. Значительная работа проделана в части расширения и систематизации научных знаний о регионе, но еще больший объем работ предстоит выполнить. Ученые также настаивают, что научный подход должен быть интегрирован во все сферы осуществляемой в данном пространстве деятельности. Этой точке зрения придерживаются и другие авторитетные эксперты, отмечающие,

что фундаментом масштабного экономического освоения Арктического региона является именно научная основа. Достижение успеха в этом процессе возможно благодаря детальному изучению особенностей региона и внедрению передовых технологий для обеспечения эффективности и рациональности освоения Арктики.

Научный подход продвигает в своих работах Н.И. Комков, рассматривая АЗРФ как международную площадку для проведения совместных исследований в области экологии и климата, ресурсосбережения и комплексного освоения в рамках международного сотрудничества [33]. К.П. Космачев ссылается на труды академика А.Е. Ферсмана, ратующего за освоение отдельных арктических территорий через научное изучение и понимание [34]. При этом К.П. Космачев отмечает приоритетность информационно-научного прогресса и широкого научного обмена в вопросах освоения Арктики. Такие позиции позволяют утверждать, что наукоемкий подход также будет играть важную роль в модернизации уже освоенных арктических плацдармов и малозаселенных территорий вдоль Севморпути, в особенности тех, которые подверглись деградации в результате хозяйственной деятельности или утратили свою прежнюю устойчивость.

Исходя из вышеизложенного анализа, построение наукоемкой модели должно базироваться на трех основных элементах (рис. 3):

- 1) ключевое логистическое ядро — порт СМП;
- 2) научный кластер — основополагающий элемент;
- 3) минерально-сырьевая база.

Научный кластер определяет преобладание типологии композиционных решений, выраженных в форме базовых морфологических типов — автономного блока и ветвистой структуры, и может быть

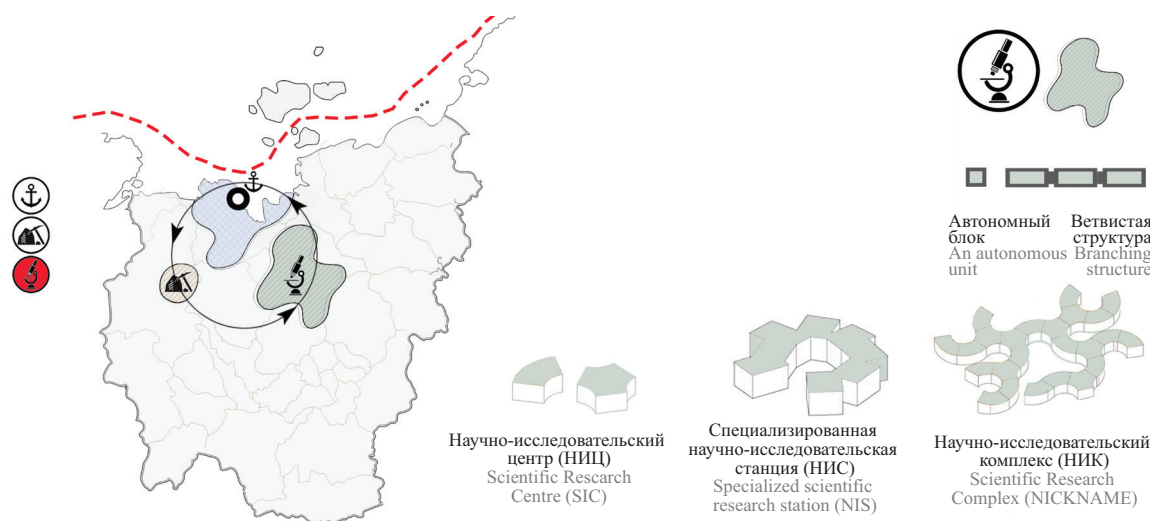


Рис. 3. Наукоемкая модель развития АЗРФ (разработала И.К. Глушкина)

Fig. 3. The high-tech development model of the Russian Arctic (developed by I.K. Glushkina)

представлен целостной системой научно-исследовательских архитектурных объектов:

- научно-исследовательские центры (НИЦ), направленные на сохранение самобытных культурных кодов и традиций КМНС, предлагается рассматривать как новый катализатор территориального развития и культурного возрождения в условиях социоэкономического упадка монопрофильных населенных пунктов. Такие центры могут интегрироваться в существующую инфраструктуру университетов европейской части страны либо функционировать в качестве автономных институциональных единиц;

- специализированные научно-исследовательские станции (НИС), ориентированные на научное сопровождение освоения уникальных природных ресурсов и ведения устойчивой деятельности на особо ценных природных территориях;

- научно-исследовательские комплексы (НИК), выполняющие роль координирующего научного хаба, объединяющего усилия смежных территорий и обеспечивающего межрегиональную научную синергию.

Также в рамках наукоемкой стратегии перспективным является развитие экспериментальных населенных пунктов.

Логистическая модель развития АЗРФ

В сфере морского транспорта внедрение модели hub-and-spoke обозначило качественный переход к новой организационной парадигме портовой инфраструктуры, предполагающей формирование крупных логистических узлов — хаб-портов. Значимым примером формирования арктического портового кластера в рамках логистической модели можно рассматривать полицентричный портовый кластер Тикси в Булунском улусе Республики Саха (Якутия). Хаб-порт формируется на основе порта Тикси, портовой станции Быковский и перспективного глубоководного порта Найба. Перспективная модель разви-

тия учтена в рамках новой схемы территориального планирования Булунского улуса¹¹, где содержится проектное решение, предусматривающее функциональную интеграцию указанных портов в единую структуру морского хаба, что нашло отражение в соответствующей градостроительной документации планируемого размещения объектов. Несмотря на отсутствие прямых железнодорожных связей с основными транспортными магистралями страны, сезонность использования наземных и речных маршрутов, перспективность разработки опорного портового кластера для СМП определяется, прежде всего, ключевым месторасположением в зоне крайне сложных навигационных условий. Данный участок СМП считается наиболее труднодоступным и характеризуется кратким сезоном судоходства и близостью к районам сезонной концентрации дрейфующих льдов. В то же время с позиции практики эффективного развития скоординированных логистических систем данная модель портового взаимодействия является перспективной. Она опирается на четкое распределение функций между элементами полицентричного хаба, в рамках которого можно выделить три базовых направления: организации терминалов технического контроля состояния судов и грузов; зон отстоя и ремонта флота; а также сегментов, ответственных за локальную и транзитную логистику.

Построение логистической модели в рамках портовой агломерации базируется на взаимодействии трех основных компонентов (рис. 4):

1) *логистический терминал, ключевые функции — обеспечение перевалки и хранения грузов, обработки и транзита, обеспечение «северного завоза», поддержка логистических операций;*

¹¹ Схема территориального планирования Булунского улуса Республики Саха (Якутия). URL: <https://mr-bulunskij.sakha.gov.ru/gradostroitelnoe-zonirovanie/shema-territorialnogo-planirovaniya>

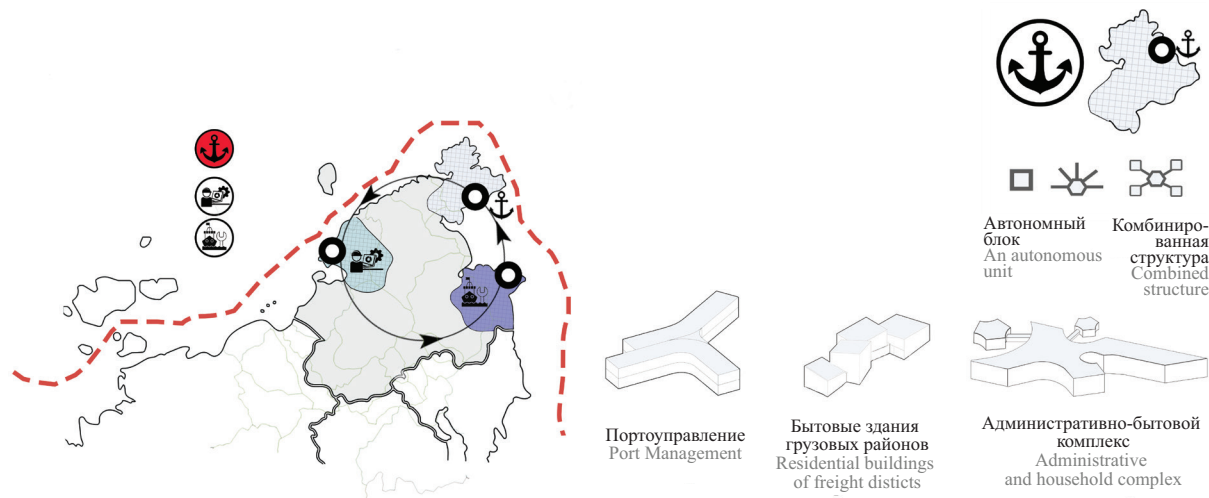


Рис. 4. Логистическая модель развития Арктической зоны Российской Федерации (разработала И.К. Глушкина)

Fig. 4. The logistic model of the development of the Arctic Zone of the Russian Federation (developed by I.K. Glushkina)

2) терминал мониторинга состояния судов, терминал бункировки и снабжения, зона ремонта, зона временного и аварийного хранения;

3) терминал обработки минеральных ископаемых и углеводородов, зона обеспечения локальной логистики.

Логистический кластер определяет преобладающие типологии композиционных решений, выраженных в форме базовых морфологических типов — автономного блока и комбинированной структуры, и может быть представлен следующими основными архитектурными объектами:

- здание администрации порта;
- портоуправление;
- комплекс крытых складов;
- бытовые здания грузовых районов;
- центральная ремонтно-механическая мастерская.

Интеграция стратегий развития портовой инфраструктуры в рамках концепции логистического кластера, представленного трехчастным полицентричным морским портом-хабом, способствует формированию модели, ориентированной на обеспечение устойчивого функционирования судоходной системы в условиях современной геополитической обстановки. Дифференциация функций между портовыми структурами вдоль маршрута, а также функциональная специализация в пределах узловых хабов позволяют существенно минимизировать риски, связанные с чрезмерной концентрацией антропогенного воздействия в отдельных географических точках.

Ресурсно-сырьевая модель развития АЗРФ

Циркумпольная зона Арктики представляет собой территорию с исключительным минерагеническим потенциалом. В пределах континентально-

го обрамления региона сосредоточены обширные запасы цветных, драгоценных, редкоземельных и радиоактивных металлов, тогда как шельфовая зона и глубоководные участки акватории обладают колоссальными ресурсами углеводородов — нефти и природного газа. В настоящее время в пределах суши и континентального шельфа АЗРФ сформирован уникальный по своим масштабам и структуре фонд минерально-сырьевых ресурсов, охватывающий как твердые полезные ископаемые, так и углеводородное сырье.

Несмотря на высокую концентрацию месторождений стратегически важных компонентов, таких как редкоземельные элементы, платиноидная группа, скандий, а также газоконденсат и свободный природный газ, объемы промышленного освоения этих ресурсов остаются ограниченными. Существующая инерционность обусловлена рядом факторов: прекращением деятельности ряда добывающих предприятий, консервацией инфраструктуры СМП, демографическим спадом, а также переходом от политики централизованного стимулирования миграции в Арктику к практике вахтовой занятости при освоении ресурсов северо-восточных территорий.

В современных условиях действенным инструментом рационального и экономически целесообразного вовлечения в хозяйственный оборот богатств минерально-сырьевой базы Арктики выступает формирование ресурсно-сырьевых кластеров на территории АЗРФ.

Построение ресурсно-сырьевой модели должно базироваться на трех основных элементах (рис. 5):

- 1) ключевое логистическое ядро — порт СМП;
- 2) *индустриальный парк*;

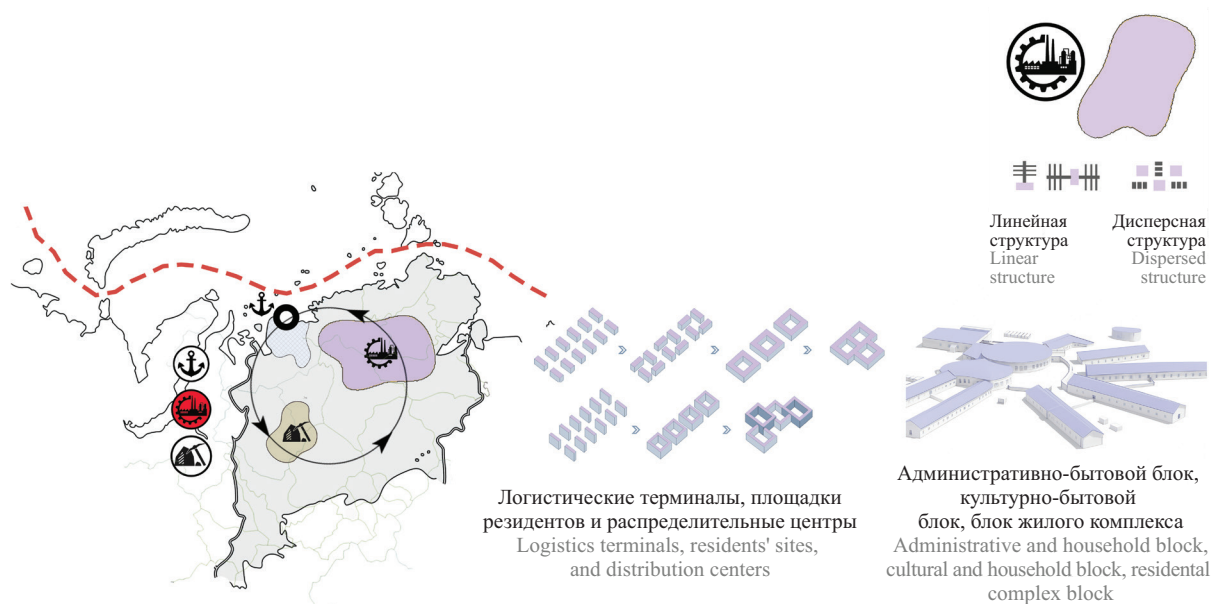


Рис. 5. Ресурсно-сырьевая модель развития Арктической зоны РФ (разработала И.К. Глушкина)

Fig. 5. Resource and raw material model of development of the Arctic Zone of the Russian Federation (developed by I.K. Glushkina)

3) сырьевая база.

Ресурсно-сырьевой кластер определяет преобладание типологии композиционных решений, выраженных в форме базовых морфологических типов — линейной структуры и дисперсной структуры, и может быть представлен агломерацией, состоящей из следующих архитектурных объектов:

- производственные корпуса;
- административно-бытовой блок;
- культурно-бытовой блок;
- логистические терминалы и распределительные центры;
- блок жилого комплекса;
- объекты инженерной инфраструктуры;
- объекты логистической инфраструктуры.

Размещение промышленных объектов в непосредственной близости от портовой инфраструктуры представляется не только рациональным, но и стратегически обоснованным решением. Подобная территориальная организация способствует значительному снижению логистических издержек, сокращает сроки доставки сырья и компонентов, облегчает применение преференциальных таможенных процедур, минимизирует потенциальное экологическое воздействие, а также формирует стабильную грузовую нагрузку на портовые мощности и обеспечивает устойчивый спрос на услуги судоремонта. Наиболее действенным форматом реализации данной концепции выступает формирование масштабного индустриального парка в припортовой зоне с централизованным управлением. Эффективность подобной модели подтверждается многочисленными примерами из международной практики.

Для более комплексной оценки автором осуществлен SWOT-анализ внедрения разработанных моделей развития: выявлены слабые и сильные стороны, угрозы и риски.

Сильные стороны:

- крупный бизнес заинтересован в новых технологических решениях для строительства;
- малое и среднее предпринимательство обеспечено заказами и мерами государственной поддержки (субсидии, льготы);
- снижение стоимости строительства в Арктике;
- тиражируемость моделей на все арктические территории.

Слабые стороны:

- сложность взаимодействия между органами государственной власти при реализации проекта;
- временной лаг, необходимый для запуска проекта.

Угрозы:

- излишняя бюрократичность государственных органов при реализации инновационных проектов;
- высокий риск недостижения параметров проекта (в соответствии с финансовой моделью) из-за увеличения стоимости строительства и транспортных расходов.

Возможности:

- комплексный подход к решению проблем арктического строительства и выполнение масштабных государственных задач в Арктике;
- возможность испытания и внедрения бизнес-идей и решений (четкая привязка к реальному сектору экономики).

Разработка концепции устойчивого развития АЗРФ базируется на тесной взаимосвязи с инфраструктурой портов СМП, учете специфических характеристик процесса становления и работы территориальной системы опорных зон Российской Арктики, охватывая ее природно-ресурсный потенциал, экологическую ситуацию и социально-экономические факторы. Данный подход предполагает использование трехступенчатой модели градостроительного развития на долгосрочную перспективу, включающий архитектурные модели в составе кластеров с образующей ролью логистического ядра — порта СМП. Этот подход позволит реализовать две важнейшие задачи в Арктическом регионе — развитие Арктической зоны в целом и портовой инфраструктуры в частности, ориентируясь при этом на территориальные особенности. Переход к устойчивому развитию в рамках данного исследования рассматривается через архитектурно-кластерный аспект и эффективное использование природных, климатических и натуральных ресурсов Арктики.

Предложенные решения базируются на основе рассматривавшейся выше новой стратегии пространственного развития и содержащихся в ней прогнозах. Ключевыми приоритетами реализации предлагаемых решений будут выступать:

1) ускоренное развитие Севморпути как международного транспортного коридора может быть реализовано путем применения *логистической модели развития*;

2) реновация ключевых опорных населенных пунктов может быть реализована посредством применения *логистической, ресурсно-сырьевой или наукоемкой модели развития*;

3) рациональное развитие ресурсной базы и технологический суверенитет могут быть реализованы путем применения *ресурсно-сырьевой модели развития*;

4) экологическая безопасность и адаптация к изменениям климата могут быть реализованы с помощью применения *наукоемкой модели развития*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлены региональные особенности, проблемы и приоритетные задачи формирования архитектурной структуры морских портов СМП на новом историческом этапе. Среди приоритетных задач, решаемых средствами градостроительства, можно выделить три основных направления:

1) возведение новых объектов и модернизация имеющейся портовой инфраструктуры СМП

как в Арктической зоне, так и за ее пределами, включая опорные порты Камчатки и Дальнего Востока;

2) модернизация существующих портов и внедрение новой портовой инфраструктуры для ремонта, обслуживания, снабжения и бункеровки судов, и создание иерархизированной (многоуровневой) логистической структуры полного спектра для осуществления перевалки грузов и обеспечения транзитных грузоперевозок по СМП;

3) развитие портовых агломерационных поселений по маршруту СМП, включая возрождение ранее брошенных поселков вне зависимости от их административного статуса или степени сохранности. В рамках данного процесса предусматривается как восстановление этих населенных пунктов в качестве постоянно действующих городских образований, так и их постепенная адаптация под формат вахтового использования.

Исходя из обозначенных в стратегиях направленностей, а также идеи развития каркасов зон АЗРФ (транспортного, энергетического и социального) разработаны три архитектурно-градостроительные модели арктических кластеров с опорой на порты Северного морского пути:

- 1) наукоемкая модель развития АЗРФ;
- 2) логистическая модель развития АЗРФ;
- 3) ресурсно-сырьевая модель развития АЗРФ.

Для каждой из обозначенных моделей, ядром которых в каждом отдельном случае является порт

СМП, предложены типовые архитектурные модели внутри кластера, на основании преобладающей типологии. Проведен SWOT-анализ использования кластерного подхода.

Обоснована необходимость дополнения новой стратегии развития АЗРФ до 2035 г. в части применения трехступенчатой модели градостроительного развития на долгосрочную перспективу, включающей: мастер-план населенного пункта, архитектурно-градостроительный кластер и типовую архитектурную модель, на основании преобладающей типологии. Целесообразность предложенных решений подтверждают обозначенные в стратегии и прогнозах ключевые приоритеты:

1) ускоренное развитие Севморпути как международного транспортного коридора может быть реализовано путем применения *логистической модели развития*;

2) реновация ключевых опорных населенных пунктов может быть реализована с помощью применения *логистической, ресурсно-сырьевой или наукоемкой модели развития*;

3) рациональное развитие ресурсной базы и технологический суверенитет могут быть реализованы посредством применения *ресурсно-сырьевой модели развития*;

4) экологическая безопасность и адаптация к изменениям климата могут быть реализованы путем применения *наукоемкой модели развития*.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бузыкина Т.А. Кластерная теория М. Портера и ее практическое применение в российском опыте // Журнал экономической теории. 2011. № 1.
2. Портер М. Международная конкуренция: конкурентные преимущества стран. М. : Альпина Паблишер, 2016. 947 с.
3. Агафонов В.А. Региональные инновационные кластеры // Региональная экономика и управление : электронный научный журнал. 2015. № 3 (43).
4. Монастырный Е.А. Инновационный кластер // Инновации. 2006. № 2 (89). С. 38–43.
5. Третьяк В.П. Кластеры предприятий. Изд. 2-е, доп. Иркутск : Изд-во Балт. гос. ун-та экономики и права, 2006. 219 с.
6. Баулина О.А., Ключин В.В. Теоретико-методические основы формирования кластера в регионе. Волгоград : ВолгГАСУ, 2014. 200 с. EDN UVUZNP.
7. Симонова М.В., Елин В.А. Кластерный подход в проектировании пространственного развития региона // Градостроительство и архитектура. 2024. Т. 14. № 3 (56). С. 167–177. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.03.21. EDN IFUYLC.
8. Сазыкина Е.В. «Кластер» как новая типологическая форма архитектурно-пространственной организации производственной деятельности //

- Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 12–1 (114). С. 114–118. DOI: 10.23670/IRJ.2021.114.12.017. EDN TWNICJ.
9. Гашенко А., Тарасова Ю. Кластер и преобразование городского пространства // Проект Байкал. 2021. Т. 18. № 67. С. 76–81. DOI: 10.51461/projectbaikal.67.1758. EDN CZZVHP.
10. Шерешева М.Ю. Проблемы создания инновационных кластеров в регионах России // Наука. Инновации. Образование. 2008. Т. 3. № 4. С. 213–230. EDN RMYGHX.
11. Абашкин В.Л., Голанд М.Ю., Гохберг Л.М., Куценко Е.С., Рудник П.Б., Шадрин А.Е. Пилотные инновационные территориальные кластеры в Российской Федерации. М. : Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2013. 108 с. EDN TNOGHF.
12. Мурашко Т.А., Шубенков М.В., Шубенкова М.Ю. Градостроительные приемы формирования кластера на уникальных природных территориях // Новые идеи нового века : мат. Междунар. науч. конф. ФАД ТОГУ. 2020. Т. 1. С. 299–305. EDN VFSDKV.
13. Кременецкий А.А., Спиридонов И.Г., Пиллицын А.Г., Веремеева Л.И. Минерально-сырьевые

кластеры Арктической зоны России и перспективы расширения внешней границы ее континентального шельфа // Руды и металлы. 2022. № 4. С. 32–53. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10021. EDN HCQYZE.

14. Гурлев И.В., Макоско А.А., Малыгин И.Г. Анализ состояния и развития транспортной системы Северного морского пути // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12. № 2 (46). С. 258–270. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-258-270. EDN FISPED.

15. Рахмангулова А.Н., Шевкунова Н.О. Оценка потенциала морских портов Российской Федерации как инфраструктурных элементов Северного морского пути // Железнодорожный транспорт: актуальные задачи и инновации. 2019. № 3. С. 82–101.

16. Долинская И.М., Болдин Н.Р. Модели формирования полицентричных морских портов-хабов и их влияние на развитие базовых припортовых городов // Universum: технические науки. 2023. № 3–1 (108). С. 60–67. DOI: 10.32743/UniTech.2023.108.3.15171. EDN EMSBJD.

17. Гапочка А. Порт-хаб как элемент транспортной системы: роль и значение // Логистика. 2016. № 10. С. 24–28.

18. Кузнецов А.Л. Морские и сухопутные порты в новой мировой системе грузораспределения // Эксплуатация морского транспорта. 2009. № 1 (55). С. 9–12. EDN KEZVNB.

19. Кузнецов А.Л., Эглит Я.Я., Кириченко А.В. Транспортный узел: к вопросу об организации деятельности // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2013. № 1 (44). С. 30–33. EDN PXUGRD.

20. Скрябин Д.С. Методика планирования взаимодействия портов-хабов в магистрально-фидерной транспортной логистической системе : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2012. 209 с. EDN QFWORZ.

21. Nam H.S., Song D.W. Defining maritime logistics hub and its implication for container port // Maritime Policy & Management. 2011. Vol. 38. Issue 3. Pp. 269–292. DOI: 10.1080/03088839.2011.572705

22. Vier T.B. Hub Ports: A case study of Port of Singapore. Porto Alegre, 2010. 66 p.

23. Шамаева Т.В., Беленя И.М. Основы устойчивого развития в архитектуре : учебно-методическое пособие. М. : Издательство МИСИ – МГСУ, 2022.

24. Васина Н.В., Теличев В.А. О концепции устойчивого развития в градостроительстве // Ученые заметки ТОГУ. 2017. Т. 8. № 2. С. 269–274. EDN ZQNSVL.

25. Есаулов Г.В. Устойчивая архитектура — от принципов к стратегии развития // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 6 (47). С. 9–24. EDN TBZNDD.

26. Сарварова Р.Р., Путинцев А.Л. Устойчивое развитие Арктической зоны Российской Федерации в современных реалиях // Архитектура и современные информационные технологии. 2024. № 4 (69). С. 256–265. DOI: 10.24412/1998-4839-2024-4-256-265. EDN MPAHA.

27. Planning and Managing Climate and Energy Transitions in Ordinary Cities // Urban Planning. 2024. Vol. 9. DOI: 10.17645/up.i346

28. DiNapoli B., Jul V. Urban planning sustainability metrics for Arctic cities // Environmental Research Letters. 2020. Vol. 15. Issue 12. P. 124023. DOI: 10.1088/1748-9326/abc37b

29. Orttung R.W., Anisimov O., Badina S., Burns C., Cho L., DiNapoli B. et al. Measuring the sustainability of Russia's Arctic cities // Ambio. 2021. Vol. 50. Issue 11. Pp. 2090–2103. DOI: 10.1007/s13280-020-01395-9

30. Родичкин И., Ишмуратова М., Буранбаева Л., Сабирьянова Л., Киушкина В., Гречко Р. и др. Том 3. Северный морской путь: история, регионы, проекты, флот и топливообеспечение. М., 2020. 105 с.

31. Порфирьев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты для жилищного сектора российской Арктики // Вестник Российской академии наук. 2021. Т. 91. № 2. С. 105–114. DOI: 10.31857/S0869587321020067. EDN HCOKLD.

32. Порфирьев Б.Н., Лексин В.Н. 2.1. Концептуальное обоснование стратегии комплексного развития Арктической зоны РФ // Арктическое пространство России в XXI веке: факторы развития, организация управления. 2016. С. 130–133. EDN XWNDJT.

33. Комков Н.И., Сулягин В.В., Бондарева Н.Н. 2.10. Методологические подходы к решению проблем Арктической зоны РФ // Арктическое пространство России в XXI веке: факторы развития, организация управления. 2016. С. 164–170. EDN XWNDNF.

34. Космачёв К.П. Пионерное освоение тайги (экономико-географические проблемы). Новосибирск : Наука, 1974. 144 с.

Поступила в редакцию 15 апреля 2025 г.

Принята в доработанном виде 19 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 20 мая 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: Инга Константиновна Глушкина — аспирант; Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (ЦНИИП Минстроя России); 119331, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 29; РИНЦ ID: 1283682, ResearcherID: MXJ-9369-2025, ORCID: 0009-0007-3105-3729; glushkina_inga@mail.ru.

REFERENCES

1. Buzykina T.A. M. Porter's Cluster Theory and Its Practical Application in Russian Experience. *Journal of Economic Theory*. 2011; 1. (rus.).
2. Porter M. *International Competition: Competitive Advantages of Countries*. Moscow, Alpina Publisher, 2016; 947. (rus.).
3. Agafonov V.A. Regional innovative clusters. *Regional Economy and Management : electronic scientific journal*. 2015; 3(43). (rus.).
4. Monastyrny E.A. Innovation Cluster. *Innovations*. 2006; 2(89):38-43. (rus.).
5. Tretyak V.P. *Clusters of enterprises. 2nd ed., suppl.* Irkutsk, Publishing house of Baltic state University of Economics and Law, 2006; 219. (rus.).
6. Baulina O.A., Klushin V.V. *Theoretical and methodological bases of formation of clusters in the region*. Volgograd, VolgGASU, 2014; 200. EDN UVUZNP. (rus.).
7. Simonova M.V., Elin V.A.I. Cluster approach in the design of spatial development of the region. *Urban Construction and Architecture*. 2024; 14(3):(56):167-177. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.03.21. EDN IFUYLC. (rus.).
8. Sazykina E.V. "Cluster" as a new typological form of architectural and spatial organization of industrial activity. *International Research Journal*. 2021; 12-1(114):114-118. DOI: 10.23670/IRJ.2021.114.12.017. EDN TWNICJ. (rus.).
9. Gashenko A., Tarasova Yu. Cluster and transformation of urban space. *Project Baikal*. 2021; 18(67):76-81. DOI: 10.51461/projectbaikal.67.1758. EDN CZZVHP. (rus.).
10. Sheresheva M.Yu. Problems of creating innovative clusters in the regions of Russia. *Science. Innovations. Education*. 2008; 3(4):213-230. EDN RMYGHX. (rus.).
11. Abashkin V.L., Goland M.Yu., Gokhberg L.M., Kutsenko E.S., Rudnik P.B., Shadrin A.E. *Pilot innovative territorial clusters in the Russian Federation*. Moscow, National Research University Higher School of Economics, 2013; 108. EDN TNOGHF. (rus.).
12. Murashko T.A., Shubenkov M.V., Shubenkova M.Y. Town-planning techniques for the formation of a recreational cluster in unique natural territories. *New ideas of the new century : materials of the international scientific conference of the FAD TNU*. 2020; 1:299-305. EDN VFSDKV. (rus.).
13. Kremenetsky A.A., Spiridonov I.G., Pilitsyn A.G., Veremeeva L.I. Mineral-and-energy clusters of the Russian Arctic and prospects for expanding the outer boundary of its continental shelf. *Ores and Metals*. 2022; 4:32-53. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10021. EDN HCQYZE. (rus.).
14. Gurlev I.V., Makosko A.A., Malygin I.G. Analysis of the state and development of the transport system of the northern sea route. *Arctic: ecology and economy*. 2022; 12(2):(46):258-270. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-258-270. EDN FISPED. (rus.).
15. Rakhmangulov A., Shevkunov N. Assessment of the potential of seaports of the Russian Federation as infrastructural elements of the northern sea route. *Railway transport: topical issues and innovations*. 2019; 3:82-101. (rus.).
16. Dolinskaia I., Boldin N. Models for the formation of polycentric sea port-hubs and their influence on the basic port cities development. *Universum: technical sciences*. 2023; 3-1(108):60-67. DOI: 10.32743/UniTech.2023.108.3.15171. EDN EMSBJD. (rus.).
17. Gapochka A. Port hub as an element of the transport system. Role and importance. *Logistics*. 2016; 10:24-28. (rus.).
18. Kuznetsov A.L. Sea and dry ports in the new world cargo distribution system. *Operation of Sea Transport*. 2009; 1(55):9-12. EDN KEZVNB. (rus.).
19. Kuznetsov A.L., Eglit Ya.Ya., Kirichenko A.V. On the issue of organising the operation of a transport hub. Transport of the Russian Federation. *Journal of science, practice, economics*. 2013; 1(44):30-33. EDN PXUGRD. (rus.).
20. Skryabin D.S. *Methodology for planning the interaction of hub ports in the main-feeder transport logistics system : dis. ... cand. of engineering sciences*. St. Petersburg, 2012; 209. EDN QFWORZ. (rus.).
21. Nam H.S., Song D.W. Defining maritime logistics hub and its implication for container port. *Maritime Policy & Management*. 2011; 38(3):269-292. DOI: 10.1080/03088839.2011.572705
22. Vier T.B. *Hub Ports: A case study of Port of Singapore*. Porto Alegre, 2010; 66.
23. Shamaeva T.V., Belenya I.M. *Fundamentals of Sustainable Development in Architecture: teaching aid*. Moscow, Publishing House MISI – MGSU, 2022. (rus.).
24. Vasina N.V., Telichev V.A. Concept of sustainable development in urban development. *Electronic scientific journal "Scientists notes PNU"*. 2017; 8(2):269-274. EDN ZQNSVL. (rus.).
25. Esaulov G.V. Sustainable architecture: from approaches to strategy of development. *Journal of Construction and Architecture*. 2014; 6(47):9-24. EDN TBZNDD. (rus.).
26. Sarvarova R.R., Putintsev A.L. Sustainable development of the arctic zone of the Russian Federation in contemporary realities. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2024; 4(69):256-265. DOI: 10.24412/1998-4839-2024-4-256-265. EDN MPAIIA. (rus.).
27. Planning and Managing Climate and Energy Transitions in Ordinary Cities. *Urban Planning*. 2024; 9. DOI: 10.17645/up.i346

28. DiNapoli B., Jul V. Urban planning sustainability metrics for Arctic cities. *Environmental Research Letters*. 2020; 15(12):124023. DOI: 10.1088/1748-9326/abc37b
29. Orttung R.W., Anisimov O., Badina S., Burns C., Cho L., DiNapoli B. et al. Measuring the sustainability of Russia's Arctic cities. *Ambio*. 2021; 50(11):2090-2103. DOI: 10.1007/s13280-020-01395-9
30. Rodichkin I., Ishmuratova M., Buranbaeva L., Sabir'yanova L., Kiushkina V., Grechko R. et al. *Volume 3. Northern Sea Route: history, regions, projects, fleet and fuel supply*. Moscow, 2020; 105. (rus.).
31. Porfiryev B.N., Eliseev D.O., Streletsky D.A. Economic assessment of the consequences of permafrost degradation for the housing sector of the Russian Arctic. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*. 2021; 91(2):105-114. DOI: 10.31857/S0869587321020067. EDN HCOKLD. (rus.).
32. Porfiryev B.N., Leksin V.N. Conceptual substantiation of the strategy for the integrated development of the Arctic zone of the Russian Federation. *The Arctic space of Russia in the 21st century: development factors, management organization*. 2016; 130-133. EDN XWNDJT. (rus.).
33. Komkov N.I., Sutyagin V.V., Bondareva N.N. *Methodological approaches to solving the problems of the Arctic zone of the Russian Federation*. The Arctic space of Russia in the 21st century: development factors, management organization. 2016; 164-170. EDN XWNDNF. (rus.).
34. Kosmachev K.P. *Pioneer development of the taiga (economic and geographical problems)*. Novosibirsk, Nauka, 1974; 143. (rus.).

Received April 15, 2025.

Adopted in revised form on May 19, 2025.

Approved for publication on May 20, 2025.

BIIONOTES: Inga K. Glushkina — postgraduate student; Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation; 29 Vernadskogo avenue, Moscow, 119331, Russian Federation; ID RSCI: 1283682, ResearcherID: MXJ-9369-2025, ORCID: 0009-0007-3105-3729; glushkina_inga@mail.ru.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 693.94:007.52

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.839-849

Роботизация производства деревянных панельных конструкций и строительства с их применением

Прокопий Георгиевич Романов

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова (СВФУ); г. Якутск Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Необходимо обеспечить вхождение Российской Федерации к 2030 г. в число 25 ведущих государств мира по показателю плотности роботизации. Решение этой важнейшей задачи должно способствовать повышению конкурентоспособности российской промышленности на мировом рынке и ускорению технологического развития страны. Роботизация определена одним из направлений развития деревянного домостроения. Условием внедрения автоматизации и роботизации является создание непрерывной цифровой среды, начиная с проектирования, изготовления, эксплуатации и утилизации строительных конструкций, охватывающей все этапы жизненного цикла строительной продукции.

Материалы и методы. Наблюдается активный рост научных статей, посвященных робототехнике в строительной сфере. По количеству опубликованных статей Россия занимает 6-е место из общего числа рассмотренной 61 страны. Эффективность роботизации строительства оценивается с точки зрения экономической эффективности строительства как длительного инвестиционного процесса. Внедрение роботизации в значительной степени зависит от вида используемых материалов и производственных операций. В настоящее время разрабатываются и внедряются в строительство образцы нового поколения отечественного автоматизированного и роботизированного строительного оборудования. Строительство с применением деревянных конструкций — одно из наиболее перспективных для роботизации направлений.

Результаты. Рассмотрен опыт изготовления роботом деревянного арочного покрытия из стандартизованных калиброванных цельнодеревянных брусков из древесины японского кипариса с применением однотипных соединений. На основании производственных показателей действующего предприятия ООО ЛПК «Алмас» в г. Якутске выполнена оценка снижения себестоимости деревянных панельных конструкций при автоматизации их выпуска на 17,48 %. Проведена экспертная оценка снижения трудозатрат при строительномонтажных работах крупнопанельных зданий, как корректный аналог многоэтажного здания из деревянных CLT-панелей, на 25 % в машино-сменах и человеко-днях.

Выводы. Условием внедрения роботизации является создание BIM высокой степени детализации. Внедрение автоматизации и роботизации в строительство с применением деревянных конструкций дает эффект на этапах заводского производственного технологического процесса и строительномонтажных работ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автоматизация и роботизация, BIM высокой степени детализации, уровень роботизации, деревянные конструкции, МХМ и CLT-панели, себестоимость

Благодарности. Автор выражает благодарность доктору технических наук, профессору К.П. Пятикрестовскому за идею статьи, а также рецензентам.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Романов П.Г. Роботизация производства деревянных панельных конструкций и строительства с их применением // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 6. С. 839–849. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.839-849

Автор, ответственный за переписку: Прокопий Георгиевич Романов, pg.romanov@mail.ru.

Robotization of production of wooden panel structures and construction with their application

Prokopii G. Romanov

North-Eastern Federal University in Yakutsk (NEFU); Yakutsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. It is necessary to ensure that by 2030 the Russian Federation is among the top 25 leading countries in the world in terms of robotization density. The solution of this most important task should contribute to increasing the competitiveness of the Russian industry in the global market and accelerating the technological development of the country.

Robotization has been identified as one of the directions of development of wooden house building. The condition for the introduction of automation and robotization is the creation of a continuous digital environment, starting from design, manufacturing, operation and disposal of building structures, covering all stages of the life cycle of construction products.

Materials and methods. There is an active growth of scientific papers devoted to robotics in the construction sphere. In terms of the number of published papers Russia ranks 6th out of the total number of 61 countries considered. The efficiency of construction robotization is assessed from the point of view of economic efficiency of construction as a long-term investment process. The introduction of robotization depends to a large extent on the type of materials and production operations used. Currently, specimens of a new generation of domestic automated and robotized construction and assembly equipment are being developed and introduced into construction. Construction using wooden structures is one of the most promising areas for robotization.

Results. The experience of robot production of wooden arch coverings made of standardized calibrated solid timber bars of Japanese cypress wood with the use of single-type joints is considered. On the basis of production indicators of the operating enterprise LPC "Almas" LLC in Yakutsk the estimation of the reduction in the cost price of wooden panel constructions by 17.48 % was made when automating their production. An expert assessment of labour cost reduction in construction and installation works of large-panel buildings, as a correct analogue of a multi-storey building made of wooden CLT-panels, by 25 % in machine-shifts and man-days was carried out.

Conclusions. A prerequisite for the implementation of robotization is the creation of BIM of a high level of detail. The introduction of automation and robotization in construction with wooden structures has an effect on the stages of the factory production process and construction and assembly work.

KEYWORDS: automation and robotization, BIM of a high degree of detail, level of robotization, wooden structures, MHM and CLT panels, cost

Acknowledgements. The author expresses gratitude to Doctor of Technical Sciences, Prof. K.P. Pyatikrestovsky for the idea of the paper, and the reviewers.

FOR CITATION: Romanov P.G. Robotization of production of wooden panel structures and construction with their application. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(6):839-849. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.839-849 (rus.).

Corresponding author: Prokopii G. Romanov, pg.romanov@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Стоит задача обеспечить вхождение Российской Федерации к 2030 г. в число 25 ведущих государств мира по показателю плотности роботизации. Решение данной важнейшей задачи должно способствовать повышению конкурентоспособности российской промышленности на мировом рынке и ускорению технологического развития страны¹. Производство роботов, автоматизация и роботизация промышленного производства, здравоохранения, сферы сервиса и различных услуг являются динамично развивающимися направлениями международной конкуренции. Производство роботов в РФ, по объему выпуска пока находясь на невысоких позициях, имеет значительный потенциал для ускоренного развития. Имеющиеся возможности производства роботов, оснащение промышленных предприятий роботизированными системами создадут мультипликативный эффект в промышленном производстве в целом. Хотя мировая тенденция использования роботизированных систем демонстрирует их наиболее активное применение в автомобильной промышленности, металлообработке и машиностроении, химической промышленности, разных видах сервиса и услуг, к перспективным отраслям роботизации относится и строительство.

В строительстве развитие цифровизации, как необходимое условие внедрения роботов в новую

отрасль, достигло высокого уровня. BIM-проектирование, разработка и успешное применение на практике отечественных облачных и других систем управления строительством, активное использование цифровых двойников строящихся объектов, строительных экосистем показывает достаточную зрелость строительной отрасли к автоматизации и роботизации строительно-монтажных работ (СМР). Имеется определенный уровень автоматизации процессов монтажа, технологических процессов отделочных работ, автоматизированного оборудования и машин контроля качества выполняемых работ. Внедрение роботизированных систем в строительство в целом, в том числе в деревянное панельное многоэтажное строительство, может реализовать значительный экономический эффект.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Роботизация в промышленном производстве и ее технологические составные части вписываются в общую схему жизненного цикла (ЖЦ) промышленной продукции. В строительстве возможно рассмотреть части ЖЦ строительных материалов и конструкций относительно возможностей автоматизации и роботизации.

Роботизация в строительстве, в соответствии с этапами ЖЦ продукции, может охватывать следующие процессы:

- формирование технического задания на проектирование с учетом роботизации всех этапов ЖЦ строительных конструкций;

¹ О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года : Указ Президента РФ от 07.05.2024 № 309.

- заводское производство строительных материалов, элементов строительных конструкций, конструкций и укрупненных монтажных блоков;

- транспортировка;
- складирование;
- монтаж;
- эксплуатация;
- ремонт;
- реновация;
- снос, демонтаж;
- утилизация.

Автоматизация и роботизация процессов строительного производства имеют продолжительную по времени историю разработки, внедрения и эксплуатации, но к настоящему времени еще не стали определяющими факторами строительства как инвестиционного процесса. Уровень роботизации — один из важных показателей, характеризующих производительность и качество продукции конкретного производства, предприятия и страны. Начиная с автоматизации отдельных операций заводского производства строительных материалов и изделий, разработки и использования машин и механизмов, заменяющих ручной труд на строительной площадке, на сегодняшний день роботизированными процессами в строительной отрасли выполняется относительно небольшой объем выпуска строительных материалов и изделий, а на строительной площадке также малая часть СМР.

Правительством РФ принимаются основополагающие решения, которые ставят задачи повышения эффективности строительного производства. Строительство как инвестиционный процесс может развиваться наиболее эффективно путем автоматизации и роботизации.

Реализуется Стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года, принятая Правительством РФ в 2022 г., которая предусматривает анализ лучших мировых практик и тенденций². Активно развивающимися мировыми трендами в строительной отрасли сегодня являются автоматизация и роботизация, снижение выбросов углекислого газа, контроль и снижение углеродного следа строящихся и реконструируемых зданий и сооружений.

Уровень роботизации, оцениваемый количеством роботов на 10 000 работающих, в российской промышленности равен 4 [1], и практически не меняется за последние несколько лет. Строительная

отрасль в этом показателе занимает статистически незначимую величину.

Задача отрасли — дальнейшее быстрое внедрение инноваций, наиболее востребованные и предпочтительные из которых автоматизация и роботизация, повышающие качество и безопасность технических решений.

В 2022 г. Минстрой и МЧС России утвердили План мероприятий (дорожную карту) по развитию деревянного домостроения на период до 2024 года³. Данная дорожная карта определила совершенствование нормативной базы строительной отрасли, в особенности в части деревянного домостроения. Актуализирован большой массив нормативных документов, разрабатываются новые документы, в том числе по панельной технологии строительства деревянных зданий.

В Плате мероприятий отмечается, что «...в промышленности строительных материалов... создана система национальных стандартов и сводов правил в области модульного строительства, деревянного домостроения».

План мероприятий предусматривает:

- обеспечение идентификации и прослеживаемости каждой партии строительных материалов и изделий, результатов лабораторных исследований при проведении контроля;

- включение в план мероприятий по реализации национальных проектов технологий промышленного домостроения (сборно-монолитного каркаса, блочно-модульного строительства, деревянного домостроения), использование современных строительных материалов, включая алюминиевые, композитные и полимерные, а также полученные за счет вторичной переработки сырья или отходов строительства и сноса;

- (роботизацию) создание системы уникальной цифровой маркировки строительных материалов и изделий, используемой для проведения контроля (надзора).

Система уникальной цифровой маркировки, имеющая длительную историю разработки, внедрения и использования в различных отраслях народного хозяйства РФ, распространяется на многие технологические этапы промышленного производства, способствует повышению эффективности учета, распределения, складского хозяйства, транспортировки. На следующих этапах использования промышленной продукции на примере строительства можно подчеркнуть, что цифровая маркировка элементов строительных конструкций позволяет максимально совершенствовать приемку на строительной площадке, обеспечивает внедрение автоматизированных и роботизированных процессов, повысить

² Стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года : утв. распоряжением Правительства РФ от 31.10.2022 № 3268-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/AdmXczBBUGfGNM8tz16r7RkQcsgP3LAm.pdf>

³ План мероприятий (дорожная карта) по развитию деревянного домостроения на период до 2024 года. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/press>

эффективность СМР. Важной возможностью, которая имеет прямое влияние на продолжительность безремонтной эксплуатации зданий и сооружений, является поэлементный учет частей и элементов строительных конструкций, позволяющий вести мониторинг их работы при длительной эксплуатации, как части непрерывного во времени процесса, начиная от заводского производства до утилизации.

Естественная последовательность развития «механизация – автоматизация – роботизация» в строительной отрасли реализуется отдельными автоматизированными системами [2–5], решающими автоматизированное выполнение отдельных операций и процессов. В настоящее время разрабатываются и внедряются в строительство образцы нового поколения отечественного автоматизированного и роботизированного строительного оборудования. Так, в 2024 г. предприятие URobot (ЮРобот) из г. Петрозаводска представило роботизированную платформу Antero 3, разработанную для использования на строительных площадках. Эта машина с функциями искусственного интеллекта может применяться в качестве погрузчика или, например, инспектора для оценки качества выполненных работ. Ресурс TAdviser представил эту технологическую роботизированную платформу с примером применения при транспортировке на объекте строительства, изготовлении полов и контроле качества и процессов⁴.

Отмечается активный рост научных статей, посвященных робототехнике в строительной сфере. По количеству опубликованных статей Россия занимает 6-е место (27 статей) из общего числа рассмотренной 61 страны, за период с 1983 г. по февраль 2024 г.⁵ Наибольшее число научных статей опубликовано в США — 259, далее следует Китай (139), Германия (77), Япония (70) и Южная Корея (69 статей).

Зарубежный опыт использования роботов в строительной отрасли показывает перспективность их применения. При среднегодовом росте рынка строительных роботов 15,5 %, с 383,11 млн долларов США в 2024 г. к 2029 г. объем рынка может достичь 787,48 млн долларов^{6, 7}. Роботы в строительстве используются при сносе зданий и сооружений, земляных работах, кладке из кирпича и блоков, 3D-печати зданий и в других целях. По сравнению с высокороботизированными отраслями, такими как производство электроники, автопром, машиностроение, химическая и пищевая промышленности,

в настоящее время объем ежегодно реализуемых строительных роботов занимает меньше чем 1 % мирового рынка (50 млрд долларов)⁴.

Цифровизация строительства — необходимое условие внедрения автоматизации и роботизации отрасли. Начиная с проектирования объекта строительства, построения его цифрового двойника, цифрового описания всех процессов, завершая передачей в эксплуатацию построенного объекта вместе с его цифровой моделью, соответствующей построенному зданию, сооружению, весь процесс должен роботизироваться с целью повышения качества и эффективности [6, 7]. Национальная ассоциация участников рынка робототехники (НАУРР) России отмечает активное развитие интегрированных ERP-систем управления предприятием (enterprise resource planning) в строительной сфере. Системы проектирования, управления и контроля роботизированными процессами строительства, эксплуатации здания и сооружения должны взаимно дополнять друг друга и составлять адаптированную часть цельной управляющей инвестиционной системы.

Определенные трудности сегодня вызваны санкциями США, ЕС и Британии к российским ИТ-компаниям. По данным TAdiser, в 2022–2024 гг. различным санкциям подверглись 107 российских компаний, при этом «наименьшие риски санкции несут для производителей ПО (программного обеспечения) и более серьезные риски — для производителей “железа”».

На рынке представлены различные системы со своими ПО, такие как АСУ «Жилищный стандарт», платформа IYNO («Айно»), система создания цифрового двойника здания BIMIT, строительная экосистема ОРЛАН System, модульная облачная ИТ-экосистема для строительства PropTech, система управления строительством SODIS Building CM и др. Эти системы существенно повышают эффективность строительства как инвестиционного процесса.

Эксперты предполагают, что эволюция робототехники, применяемой при СМР, станет основываться на развитии совокупности датчиков, информация с которых будет создавать среду высокоэффективной деятельности робота, картографической основы и управления ее изменением, и использования алгоритмов искусственного интеллекта.

Развитие промышленного производства идет в основном как последовательность внедрения механизации, автоматизации и роботизации. Роботизация является самой развитой формой современной автоматизации производства. В этой последовательной цепочке этапов развития организации промышленного производства деревообрабатывающее производство занимает особое место. Традиционно внедрение механизации и автоматизации в деревообрабатывающей отрасли шло с некоторым запаздыванием во времени, в основном на уровне низовой автоматизации.

⁴ TAdviser. URL: <https://www.tadviser.ru/>

⁵ Размер рынка строительных роботов. URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/construction-robots-market/market-size>

⁶ НАУРР. URL: <https://robotunion.ru/>

⁷ Газпромбанк инвестиции. URL: <https://gazprombank.investments/blog/reviews/robotics/>

В современной деревообрабатывающей промышленности при общем достаточно высоком уровне механизации и автоматизации станки и оборудование с числовым программным управлением (ЧПУ), полностью автоматизированные деревообрабатывающие центры появились в последнее десятилетие. Имеется опыт применения металлообрабатывающего в своей основе деревообрабатывающего центра с ЧПУ для изготовления цельнодеревянных элементов конструкций каркасного здания из твердых пород древесины (Франция). Ожидается широкое внедрение автоматизированных деревообрабатывающих центров.

Эффект роботизации может быть рассмотрен на этапе производства деревянных панелей и СМР.

Механизация и автоматизация оказывают определенное влияние на формирование составляющих себестоимость продукции затрат. Сокращается количество занятых на участке (этапе) производства, снижается фонд оплаты труда, повышается тарифная ставка высококвалифицированных специалистов, применяется совокупность мер поощрения и стимулирования за высококвалифицированный труд. Повышается качество продукции, качество выпускаемой продукции становится стабильным. В целом происходит значительное снижение себестоимости,

повышаются эффективность производства и конкурентоспособность.

Эксперты считают, что ожидаемым вызовом для строительной отрасли будет рост индивидуализации объемно-планировочных решений жилья, произойдет переход от массового промышленного производства к массовой кастомизации (индивидуализации проектов жилья и домов), и важным условием реализации этого процесса будет развитие цифровых технологий производства [8].

Рассмотрен опыт изготовления роботом деревянного арочного покрытия из стандартизованных калиброванных цельнодеревянных брусков из древесины японского кипариса с применением однотипных соединений. Шестикоординатный робот KUKA R2100 со скоростью 2 м/с имеет широкий диапазон движения — в вертикальной плоскости от +35 до -135°, в горизонтальной плоскости по 185° в обе стороны. Соединение брусков, состоящее из двустороннего клеенанесения и саморезов, обеспечивает требуемую прочность и деформативность. Полученный результат продемонстрировал успешное взаимодействие человека и робота (HRI — human-robot interaction) (рис. 1–3).

Заводское производство деревянных каркасных панелей апробировано в США на роботизирован-

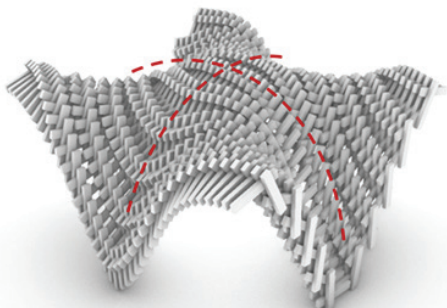


Рис. 1. Вариант проекта арки [8]

Fig. 1. Arch design option [8]

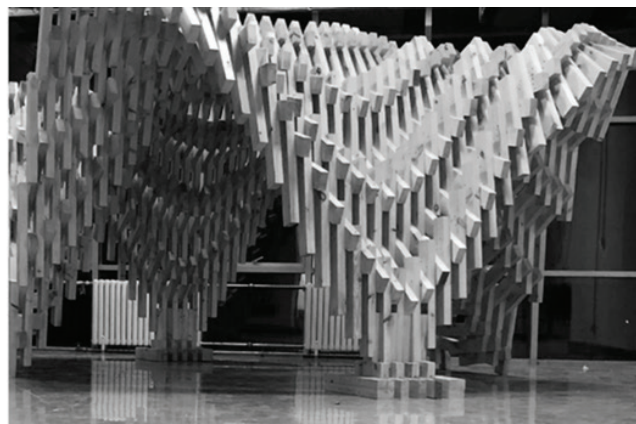


Рис. 2. Робот строит арку [8]

Fig. 2. A Robot is building an arch [8]



a



b

Рис. 3. Конструкции, построенные роботом KUKA R2100 (a); арка из деревянных элементов (b) [8]

Fig. 3. Structures built by the KUKA R2100 robot (a); is an arch made of wooden elements (b) [8]

ном участке, состоящем из двух роботов. Успешно решено эффективное взаимодействие роботов, основанное на восприятии роботами положения деревянных элементов в пространстве и топологии изготавливаемой конструкции и движения их рабочих органов. Восприятие информации, анализ и принятие мер по устранению неопределенностей решены внедрением адаптивного управления группы роботов (рис. 4).

Взаимная интеграция роботизированных проектирующих, строительно-монтажных, контролируемых и управляющих систем обеспечит дальнейшее повышение эффективности строительной отрасли.

Экспертные оценки эффективности внедрения роботизации в различных промышленных производствах подчеркивают зависимость конечного результата от физических свойств, вида, структуры, габаритов, весовых характеристик исходного сырья и обрабатываемых материалов. Заводское производство и монтаж деревянных крупноразмерных панельных конструкций возможно отнести к одним из наиболее перспективных для применения роботов направлений в строительстве. Имеются исследования, посвященные различным аспектам производства, монтажа и эксплуатационных вопросов деревянных панельных конструкций в многоэтажном строительстве. Актуальны вопросы исследования CLT-панелей (cross laminated timber) [10–23].

На примере производств, выпускающих МХМ-панели и близкие к ним конструктивно, или аналогичную продукцию, можно проанализировать возможный эффект от внедрения автоматизации

и роботизации выпуска панелей, по сравнению с имеющейся в ООО ЛПК «Алмас» в г. Якутске традиционной технологией сборки МХМ-панелей.

Автоматизированные системы управления производственными процессами, это и технологические линии по производству МХМ-панелей, являются распределенными по уровням и интегрированными по функциям. Каждому уровню управления технологическими процессами соответствуют определенные функции, реализованные соответствующим ПО и техническими средствами автоматизации [24, 25].

На рис. 5 приведена принципиальная схема распределенных систем управления автоматизированными процессами производства.

Внедрение автоматизации по вышеуказанной схеме позволяет реализовать все перспективы и резервы станков и оборудования, технологической линии по возможному снижению себестоимости производства МХМ-панелей.

В таблице приведена калькуляция панельной продукции, выпускаемой автоматизированной линией по производству МХМ-панелей, по предлагаемому варианту на базе ООО ЛПК «Алмас» (рис. 6).

Принятая за базовый вариант калькуляция себестоимости МХМ-панелей действующего производства определяет себестоимость 1 м³ в размере 20 911,39 руб., стоимость изделия с НДС 20 % составляет 30 000 руб. Таким образом, можно сделать вывод о том, что внедрение автоматизации в ООО ЛПК «Алмас» позволит снизить себестоимость МХМ-панелей на 17,48 %.

На этапе СМР при монтаже МХМ или CLT-панелей по аналогии с формированием составляю-

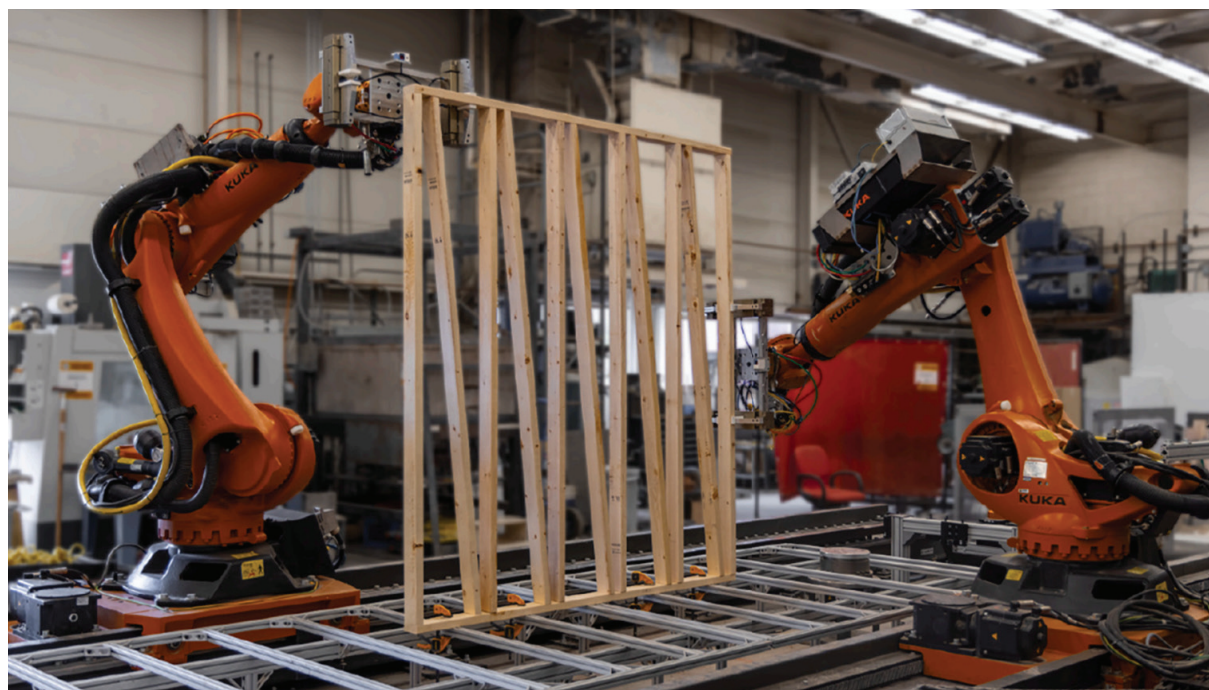


Рис. 4. Роботизированная сборка каркаса деревянных панелей [9]

Fig. 4. Robotic assembly of the wooden panel frame [9]

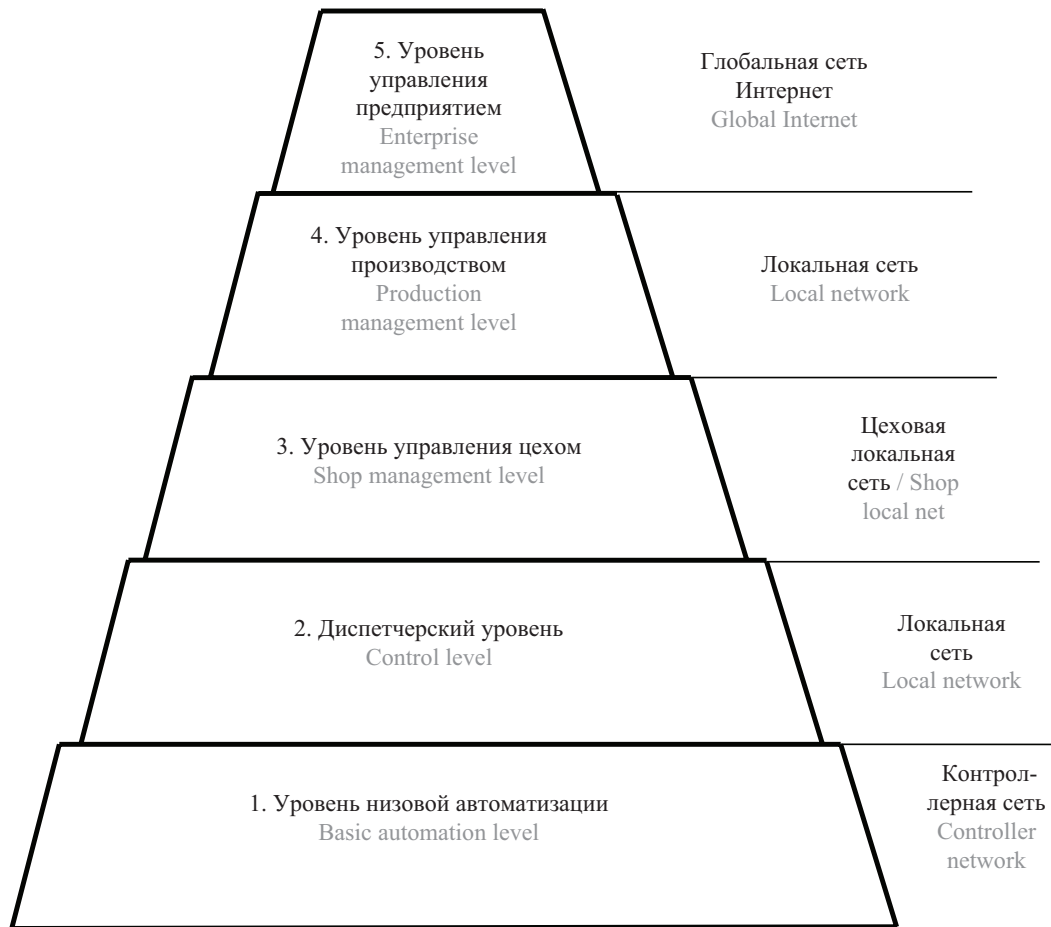


Рис. 5. Пример сетевых уровней распределенных систем управления. Использован и переработан [24]

Fig. 5. An example of network layers of distributed control systems. Used and modified [24]



Рис. 6. Производство МХМ-панелей в ЛПК «Алмас»

Fig. 6. Production of МНМ panels at the “LPC Almas” LLC

щих калькуляции себестоимости монтажа крупнопанельных зданий рассмотрены показатели затрат труда в человеко-днях и машино-сменах кранового и строительного-монтажного оборудования на примере монтажа крупнопанельного здания [26]. Калькуляция показывает (табл. 9 [26]) соотношение анализируемых показателей — 1413,35 чел.-дн.

и 183,86 машино-смен. При этом 681,58 чел.-дн. (48 %) связаны с механизированными работами (монтаж кранами), а оставшиеся 731,76 чел.-дн. (52 %) — это работы, выполняемые вручную (электросварка, заделка стыков, утепление, нанесение антикоррозионного покрытия, заделка швов раствором). Автоматизация и роботизация СМР строитель-

Калькуляция себестоимости панели, вариант автоматизированного производства, руб. (за базовый вариант принят 2022 г.)

Panel cost calculation, automated production option (2022 is accepted as the base option)

Номер Number	Показатель Indicator	Сумма Amount
1–8	Материалы, сушка, фонд оплаты труда, районный коэффициент и северные надбавки, страховые взносы, общепроизводственные затраты (без сырья) Materials, drying, wage fund, regional coefficient and northern allowances, insurance premiums, general production costs (without raw materials)	2135,28
9	Прямые затраты Direct costs	2013,46
10	Накладные затраты (без сырья) 15 % Overhead costs (without raw materials) 15 %	897,92
11	Итого себестоимость 1м ³ Total cost 1 m ³	17 255,14
12	Рентабельность, 20 % Profitability, 20 %	3451,03
13	Стоимость изделия за 1 м ³ без НДС Product cost per 1 m ³ , excluding VAT	20 706,17
14	Стоимость изделия за 1 м ³ с НДС 20 % Product cost per 1 m ³ , with VAT 20 %	24 847,404

ства деревянных домов из МХМ или CLT-панелей могут существенно сократить трудозатраты, в первую очередь связанные с эксплуатацией кранов, их управлением, сопровождением и другими сопутствующими действиями. Другая область внедрения автоматизированных и роботизированных систем — замена ручного труда путем разработки и внедрения соответствующего оборудования. В указанных двух областях внедрения автоматизации и роботизации даже на первоначальном этапе опытной эксплуатации возможно снижение трудозатрат на половину, т.е. на 25 % в каждой области, по сравнению с существующим положением.

Роботизация окажет значительное влияние на формирование себестоимости СМР, например, при строительстве многоэтажных жилых домов из CLT-панелей. Изменится амортизационная составляющая, при содержании и эксплуатации роботизированных систем она возрастет по сравнению с применением обычных крановых и подъемно-транспортных механизмов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведен анализ состояния автоматизации и роботизации в строительной отрасли. Проанализирован опыт проектирования и строительства деревянной арки роботом, получившей оценку как пример успешного сотрудничества человека и робота. Рассмотрено пробное изготовление деревянного каркаса стеновой панели двумя взаимодействующими роботами. Обосновано, что деревянные МХМ и CLT-панели являются строительными конструкциями, перспективными для заводского роботизированного производства и СМР. На основании производственных показателей действующего предприятия ООО ЛПК «Алмаз» (г. Якутск) сделана оценка снижения себестоимости деревянных панельных конструкций при автоматизации их выпуска на 17,48 % (рис. 7).

Сделана экспертная оценка снижения трудозатрат при СМР крупнопанельных зданий, как корректный аналог многоэтажного здания из деревянных CLT-панелей, на 25 % в машино-сменах и человеко-днях.



Рис. 7. Панельный дом производства ООО ЛПК «Алмаз» в п. Бясь-Кюэль Горного района Республики Саха (Якутия)

Fig. 7. Panel house produced by “LPK Almas” LLC in the village of Byas-Kyuel in the Gorniy District of the Republic of Sakha (Yakutia)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Строительство с применением деревянных МХМ и CLT-панелей является перспективным направлением внедрения роботизации в строительство. Условием внедрения роботизации служит

создание BIM высокой степени детализации. Внедрение автоматизации и роботизации в строительство с применением деревянных конструкций дает эффект на этапах заводского производственного технологического процесса и строительного-монтажных работ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Конюховская А., Цыпенкова В.* Рынок робототехники: угрозы и возможности для России. Издательские решения, 2019. 180 с.
2. *Михеев Г.В.* Применение технологий автоматизации и роботизации в строительстве // Высокие технологии в строительном комплексе. 2022. № 1. С. 209–214. EDN QHJAMQ.
3. *Михеев Г.В., Яновская Э.Д.* Роботизированная техника в строительстве // Научные труды КубГТУ. 2019. № 2. С. 181–188. EDN UOLQOS.
4. *Вильман Ю.А.* Основы роботизации в строительстве. М.: Высшая школа, 1989. 270 с.
5. *Емельянов С.Г., Булгаков А.Г., Червяков Л.М., Асмолов А.С., Бычкова Л.В., Бузало Н.С.* Роботизация и автоматизация строительных процессов: монография. Курск, 2014. 322 с. EDN UBGFHP.
6. *Liu Y., Alias A.H., Haron N.A., Bakar N.A., Wang H.* Robotics in the Construction Sector: Trends, Advances, and Challenges // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2024. Vol. 110. Issue 2. DOI: 10.1007/s10846-024-02104-4
7. *Hu R., Pan W., Iturralde K., Linner T., Bock T.* Construction Automation and Robotics for Concrete Construction: Case Studies on Research, Development, and Innovations // Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC). 2023. DOI: 10.22260/ISARC2023/0095
8. *Leng Y., Shi X., Hiroatsu F., Kalachev A., Wan D.* Automated construction for human–robot interaction in wooden buildings: Integrated robotic construction and digital design of iSMART wooden arches // Journal of Field Robotics. 2023. Vol. 40. Issue 4. Pp. 810–827. DOI: 10.1002/rob.22154
9. *Adel A., Ruan D., McGee W., Mozaffari S.* Feedback-driven adaptive multi-robot timber construction // Automation in Construction. 2024. Vol. 164. P. 105444. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105444
10. *Мавлюбердинов А.Р., Хоцянян Д.Н.* Технологические особенности возведения многоэтажных жилых зданий из CLT-панелей // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 1 (43). С. 219–225. EDN UOVVCG.
11. *Бойтемирова И.Н., Давыдова Е.А.* CLT-панели — эффективный материал из древесины для несущих и ограждающих конструкций зданий // Вестник научных конференций. 2016. № 12–1 (16). С. 18–21. EDN XRFQCV.
12. *Есауленко И.В.* Перспективы развития высотного деревянного домостроения в России на примере зарубежного опыта // Архитектура, строительство, транспорт. 2021. № 4. С. 17–25. DOI: 10.31660/2782-232X-2021-4-17-25. EDN OFUFZP.
13. *Ван-Хо-Бин Е.А.* Перспективы строительства высотных зданий из CLT-панелей в России // Новые идеи нового века: мат. Междунар. науч. конф. ФАД ТОГУ. 2016. Т. 3. С. 213–217. EDN VSVDJH.
14. *Туманов А.В., Иванцов Р.А., Пензяков В.Д., Шитова И.Ю.* Перспективы многоэтажного деревянного строительства из CLT-панелей в России // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. 2021. № 1 (12). С. 43–49. EDN FAOVOG.
15. *Ляпина Д.А.* Перспективы развития строительства домов из деревянных CLT панелей в России // Образование. Наука. Производство: XIII Междунар. молодежный форум. 2021. С. 1752–1753. EDN VJDJIT.
16. *Журович Е.А., Козлова К.С., Шкорко М.Ю.* CLT-панели — перспективный строительный материал // Журнал естественно-научных исследований. 2017. Т. 2. № 4. С. 89–98. EDN ZWSULN.
17. *Третьяков Н.В., Вохрамеева П.С.* Ограждающие конструкции каркасных зданий с применением CLT-панелей // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство: сб. ст. 2019. С. 56–61. EDN RQYSZJ.
18. *Якуненкова М.С., Осетрина Д.А.* Возможность использования CLT-панелей в жилом строительстве для условий Салехарда // Современное строительство и архитектура. 2022. № 6. С. 4–9. DOI: 10.18454/mca.2022.30.6.001. EDN OCKEJL.
19. *Амельчугов С.П., Тарасов И.В., Шубкин Р.Г., Иванов Д.В., Никулин М.А.* Пожарная безопасность несущей звукозащитной деревянной CLT панели // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2022. № 2 (25). С. 9–14. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2022.35.47.001. EDN NCLUBJ.
20. *Захватов Д.М., Жантлисов Т.А., Рузаев С.Н.* Оценка пожарной опасности конструкций из CLT панелей // Региональные проблемы геологии, географии, техносферной и экологической безопасности: мат. IV Всеросс. науч.-практ. конф. 2022. С. 128–132. EDN UVJQOG.

21. *Захватов Д.М., Рузаев С.Н.* Пожарная безопасность конструкций из CLT панелей // В фокусе достижений молодежной науки : мат. ежегодной итоговой науч.-практ. конф. 2023. С. 195–197. EDN CSYXUH.

22. *Пехотиков А.В., Абаишкин А.А., Голкин А.В., Гомозов А.В.* Особенности противопожарной защиты многоквартирных жилых зданий с применением конструкций из перекрестноклееной древесины // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. XXXV Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 348–357. EDN OLKFPC.

23. *Салимуллин А.Р., Смирнов П.Н.* Разработка и исследование узловых соединений древесины перекрестноклееной на винтах, в том числе для многоэтажных зданий // Вестник НИЦ Строительство. 2022.

№ 1 (32). С. 53–64. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-1(32)-53-64. EDN HWCQUZ.

24. *Дорошенко В.А.* Синтез технологической структуры автоматизированных технологических процессов первичной обработки древесины. Красноярск : КГТА, 1996. 299 с.

25. *Дорошенко В.А., Друк Л.В.* Проектирование распределенных систем управления : учебное пособие. М. : Изд-во Московского гос. ун-та леса, 2012. 524 с. EDN QMXPDP.

26. *Несветаев Г.В., Корянова Ю.И.* Технология возведения крупнопанельных зданий с применением современных строительных материалов : учебное пособие. М. : Издательский дом «Академия естествознания», 2023. 92 с. EDN KZKERQ.

Поступила в редакцию 9 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 14 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 14 апреля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Прокопий Георгиевич Романов** — кандидат технических наук, доцент, кафедра проектирования, строительства, технологий Инженерно-технического института; **Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова (СВФУ)**; 677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Белинского, д. 58; РИНЦ ID: 422161, Scopus: 572158872791, ResearcherID: HDN-7525-2022, ORCID: 0000-0001-7744-592X; pg.romanov@mail.ru.

REFERENCES

1. Konyukhovskaya A., Tsyplenkova V. *Robotics market: threats and opportunities for Russia*. Publishing solutions, 2019; 180. (rus.).

2. Mikheev G.V. Application of automation technologies and robotics in construction. *High Technologies in Construction Complex*. 2022; 1:209-214. EDN QHJAMQ. (rus.).

3. Mikheev G.V., Yanovskaya E.D. Robotic engineering in construction. *Scientific Works of KubSTU*. 2019; 2:181-188. EDN UOLQQS. (rus.).

4. Vilman Yu.A. *Fundamentals of robotization in construction*. Moscow, Higher School, 1989; 270. (rus.).

5. Emelyanov S.G., Bulgakov A.G., Chervyakov L.M., Asmolov A.S., Bychkova L.V., Buzalo N.S. *Robotization and automation of construction processes : monograph*. Kursk, 2014; 322. EDN UBGFHP. (rus.).

6. Liu Y., Alias A.H., Haron N.A., Bakar N.A., Wang H. Robotics in the Construction Sector: Trends, Advances, and Challenges. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2024; 110(2). DOI: 10.1007/s10846-024-02104-4

7. Hu R., Pan W., Iturralde K., Linner T., Bock T. Construction Automation and Robotics for Concrete Construction: Case Studies on Research, Development, and Innovations. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC)*. 2023. DOI: 10.22260/ISARC2023/0095

8. Leng Y., Shi X., Hiroatsu F., Kalachev A., Wan D. Automated construction for human–robot interaction

in wooden buildings: Integrated robotic construction and digital design of iSMART wooden arches. *Journal of Field Robotics*. 2023; 40(4):810-827. DOI: 10.1002/rob.22154

9. Adel A., Ruan D., McGee W., Mozaffari S. Feedback-driven adaptive multi-robot timber construction. *Automation in Construction*. 2024; 164:105444. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105444

10. Mavlyuberdinov A.R., Khotsanian D.N. Technological features of erecting multi-storey residential buildings from CLT-panels. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2018; 1(43):219-225. EDN UOVVCG. (rus.).

11. Boytemirova I.N., Davydova E.A. CLT panels — an effective wood material for load-bearing and enclosing structures of buildings. *Bulletin of Scientific Conferences*. 2016; 12-1(16):18-21. EDN XRFGCV. (rus.).

12. Esaulenko I.V. Prospects for the development of high-rise wooden housing construction in Russia on foreign experience. *Architecture, Construction, Transport*. 2021; 4:17-25. DOI: 10.31660/2782-232X-2021-4-17-25. EDN OFUFZP. (rus.).

13. Van-Kho-Bin E.A. Perspectives for the high-rise buildings construction from CLT-panels in Russia. *New ideas of the new century : materials of the international scientific conference of the FAD TNU*. 2016; 3:213-217. EDN VSVDJH. (rus.).

14. Tumanov A.V., Ivantsov R.A., Penzyakov V.D., Shitova I.Yu. The prospects of multi-storey wooden construction from CLT-panels in Russia. *PGUAS Bulletin: construction, science and education*. 2021; 1(12):43-49. EDN FAOVOG. (rus.).
15. Lyapina D.A. Prospects for the development of construction of houses from wooden CLT panels in Russia. *Education. Science. Production : XIII International Youth Forum*. 2021; 1752-1753. EDN VJDJIT. (rus.).
16. Zhironovich E., Kozlova K., Shkorko M. CLT panel — a promising building material. *Journal of Natural Sciences Research*. 2017; 2(4):89-98. EDN ZWSULN. (rus.).
17. Tretyakov N.V., Vohrameeva P.S. Enclosing structures of a frame building made with the use of CLT-panels. Traditions and innovations in construction and architecture. *Construction : collection of articles*. 2019; 56-61. EDN RQYSZJ. (rus.).
18. Yakunenkov M.S., Osetrina D.A. A possibility of using CLT panels in residential construction for Salekhard. *Modern Construction and Architecture*. 2022; 6:4-9. DOI: 10.18454/mca.2022.30.6.001. EDN OCKEJL. (rus.).
19. Amelchugov S.P., Tarasov I.V., Shubkin R.G., Ivanov D.V., Nikulin M.A. Fire safety of the soundproof wooden CLT panel carrier. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2022; 2(25):9-14. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2022.35.47.001. EDN NCLUBJ. (rus.).
20. Zaxvatov D.M., Zhantlisov T.A., Ruzaev S.N. Fire hazard assessment of structures made of CLT panels. *Regional problems of geology, geography, technosphere and environmental safety : materials of the IV All-Russian scientific and practical conference*. 2022; 128-132. EDN UVJQOG. (rus.).
21. Zakhvatov D.M., Ruzaev S.N. Fire safety of structures made of CLT panels. *In focus of achievements of youth science : materials of the annual final scientific and practical conference*. 2023; 195-197. EDN CSYXUH. (rus.).
22. Pehotikov A.V., Abashkin A.A., Golkin A.V., Gomozov A.V. Features of fire protection of multi-apartment residential buildings using structures made of cross-laminated wood. *Actual problems of fire safety : proceedings of the XXXV International Scientific and Practical Conference*. 2023; 348-357. EDN OLKFPC. (rus.).
23. Salimullin A.R., Smirnov P.N. Development and research of screwed cross-laminated timber nodal joints for multi-storey buildings. *Bulletin of the Scientific Research Center Construction*. 2022; 1(32):53-64. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-1(32)-53-64. EDN HWCQUZ. (rus.).
24. Doroshenko V.A. *Synthesis of the technological structure of automated technological processes of primary wood processing*. Krasnoyarsk, KGTA, 1996; 299. (rus.).
25. Doroshenko V.A., Druk L.V. *Design of distributed control systems : tutorial*. Moscow, Publishing house of Moscow state University of Forestry, 2012; 524. EDN QMXPDP. (rus.).
26. Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I. *Technology of construction of large-panel buildings using modern building material s: tutorial*. Moscow, Publishing House “Academy of Natural Sciences”, 2023; 92. EDN KZKEPQ. (rus.).

Received September 9, 2024.

Adopted in revised form on April 14, 2025.

Approved for publication on April 14, 2025.

B I O N O T E S : **Prokopii G. Romanov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Design, Construction, and Technology, Engineering and Technical Institute; **North-Eastern Federal University in Yakutsk (NEFU)**; 58 Belinsky st., Yakutsk, 677000, Russian Federation; ID RSCI: 422161, Scopus: 572158872791, ResearcherID: HDN-7525-2022, ORCID: 0000-0001-7744-592X; pg.romanov@mail.ru.

Вычислительный алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния и устойчивости тонкостенных оболочек

Николай Александрович Мишуренко^{1,2}, Алексей Александрович Семенов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия;

² ООО «Газпром проектирование»; г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследования процессов деформирования оболочек преимущественно осуществляют с использованием вычислительных алгоритмов, реализующих применение различных численных методов. Данные алгоритмы должны обеспечивать получение точных результатов и высокую скорость выполнения расчетов, а также быть устойчивы к изменению входных параметров (геометрия, материал). Цель данного исследования — разработка вычислительного алгоритма расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) и устойчивости оболочек, построенного на применении метода Ритца и метода Ньютона, обеспечивающего высокую производительность и устойчивость решения.

Материалы и методы. Деформирование оболочечных конструкций описывается геометрически нелинейной математической моделью типа Тимошенко – Рейсснера, которая учитывает поперечные сдвиги и ортотропию материала. Математическая модель записана в виде функционала полной потенциальной энергии деформации оболочки. Исследование НДС и устойчивости конструкции сводится к нахождению минимума функционала. Методом Ритца данная задача сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений. Решение полученной системы осуществляется методом Ньютона. Отличительная особенность этого алгоритма — применение адаптивного шага по нагрузке при решении системы нелинейных алгебраических уравнений.

Результаты. Проведены расчеты конструкций: пологих оболочек двоякой кривизны и цилиндрических панелей из изотропных и ортотропных материалов. Полученные значения критических нагрузок имеют хорошую согласованность с результатами других авторов: для пологих оболочек двоякой кривизны максимальное расхождение результатов составило 8,05 %, для цилиндрических панелей — 7,29 %.

Выводы. Разработан устойчивый к изменению геометрии и материала конструкции вычислительный алгоритм расчета НДС и устойчивости оболочек. Высокая производительность алгоритма обеспечивается за счет применения адаптивного шага по нагрузке при решении системы нелинейных алгебраических уравнений. Обоснована возможность использования алгоритма при исследовании пологих оболочек двоякой кривизны и цилиндрических панелей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оболочка, панель, вычислительный алгоритм, метод Ритца, метод Ньютона, адаптивный шаг, устойчивость

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам за конструктивные замечания и рекомендации, которые помогли улучшить качество исследования и расширить его научную значимость.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мишуренко Н.А., Семенов А.А. Вычислительный алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния и устойчивости тонкостенных оболочек // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 6. С. 850–866. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.850-866

Автор, ответственный за переписку: Николай Александрович Мишуренко, nikolai8421@mail.ru.

Computational algorithm for calculating the stress-strain state and buckling of thin-walled shells

Nikolai A. Mishurenko^{1,2}, Alexey A. Semenov¹

¹ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
Saint Petersburg, Russian Federation;

² LLC “Gazprom proektirovanie”; Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The studies of the processes of deformation of shells are mainly carried out using computational algorithms that implement the application of various numerical methods. These algorithms must ensure obtaining accurate results and high speed of calculations, and must also be resistant to changes in input parameters (geometry, material). The purpose of this work is to develop a computational algorithm for calculating the stress-strain state (SSS) and buckling of shells, based on the application of the Ritz method and the Newton method, ensuring high productivity and stability of the solution.

Materials and methods. The deformation of shell structures is described by a geometrically nonlinear mathematical model of the Timoshenko – Reissner type, which considers transverse shears and orthotropy of the material. The mathematical model is written as a functional of the total potential energy of deformation of the shell. The study of the stress-strain state and buckling of the structure is reduced to finding the minimum of the functional. Using the Ritz method, this problem is reduced to solving a system of nonlinear algebraic equations. The solution of the resulting system is carried out using the Newton method. A distinctive feature of this algorithm is the use of an adaptive step by load when solving a system of nonlinear algebraic equations.

Results. Calculations of structures were performed: shallow shells of double curvature and cylindrical panels made of isotropic and orthotropic materials. The obtained values of critical loads have good agreement with the results of other authors: for shallow shells of double curvature, the maximum discrepancy of results was 8,05 %, and for cylindrical panels 7,29 %.

Conclusions. A computational algorithm for calculating the stress-strain state and buckling of shells that is stable to changes in geometry and material of the structure has been developed. High performance of the algorithm is ensured by using an adaptive step by load when solving a system of nonlinear algebraic equations. The possibility of using this algorithm when studying shallow shells of double curvature and cylindrical panels has been substantiated.

KEYWORDS: shell, panel, computational algorithm, Ritz method, Newton method, adaptive step, buckling

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments and recommendations, which helped improve the quality of the study and expand its scientific significance.

FOR CITATION: Mishurenko N.A., Semenov A.A. Computational algorithm for calculating the stress-strain state and buckling of thin-walled shells. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(6):850-866. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.850-866 (rus.).

Corresponding author: Nikolai A. Mishurenko, nikolai8421@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Тонкостенные оболочечные конструкции используются в различных отраслях: промышленном и гражданском строительстве [1–3], космостроении [4, 5], авиастроении [6], судостроении [7], машиностроении [8–10], что связано с накоплением экспериментальных данных [11–13] и постоянным развитием теории и методов расчета оболочек [14–16].

Начиная с XX в. вектор научных исследований оболочек ориентирован на разработку математических моделей деформирования конструкций, учитывающих их нелинейное поведение (геометрическая, физическая нелинейность), и вычислительных алгоритмов, в которых реализовано применение численных методов. В настоящее время наряду с классическими направлениями научных изысканий по развитию теории оболочек особый интерес представляют исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) и устойчивости тонкостенных оболочек при запроектных воздействиях [3, 5, 8, 16].

Значительное количество исследований процесса деформирования оболочек проведено с использованием классического метода конечных элементов (МКЭ) [17–19] и др. Однако, несмотря на это, разработка математических моделей процесса деформирования и вычислительных алгоритмов расчета оболочек является актуальной задачей.

Разработан алгоритм для изучения устойчивости цилиндрических оболочек из полимерных композиционных материалов (ПКМ), основанный на применении МКЭ, линеаризации Ньютона – Канторовича, использовании метода последовательных приближений и шагового метода по нагрузке [6].

Ряд работ [20–22] посвящен развитию МКЭ (модификация или создание новых конечных элементов) для исследования НДС оболочек.

В.В. Петровым предложен алгоритм для расчета неоднородных по толщине оболочек (учитываются геометрическая и физическая нелинейности), заключающийся в построении инкрементальных линейных уравнений и их решении методом двухшагового последовательного возмущения параметров, разработанным автором [16].

Р.А. Каюмов в статье [23] для нахождения критических нагрузок потери устойчивости пологих панелей и арок предложил вариационный метод решения, основанный на разложении перемещений в ряд Фурье.

Исследования свободных колебаний оболочечных конструкций осуществлялись с применением алгоритмов на основе метода Ритца [24–26]; метода Рэлея – Ритца [27]. В трудах [28–30] для изучения деформирования плит использованы алгоритмы с модификациями метода Ритца.

В работе [31] математическая модель деформирования сферической оболочки представлена в виде уравнений Маргерра. Алгоритм нахождения конечных прогибов купола базируется на применении метода Рэлея – Ритца: задача сводится к решению системы нелинейных уравнений. Решение полученной системы реализовано методом непрерывного продолжения. Для нивелирования погрешности, возникающей при численном решении системы уравнений продолжения, применяется метод дискретного продолжения, основанный на методе Ньютона – Рафсона.

Метод Бубнова – Галеркина использован для решения системы дифференциальных уравнений состояния изотропных пологих оболочек на упругом основании с учетом геометрической нелинейности [32], в результате чего были выведены аналитические уравнения для определения напряжений и критической нагрузки потери устойчивости.

Л.Ю. Ступишиным и К.Е. Никитиным [33] предложен алгоритм, базирующийся на использовании метода Бубнова – Галеркина в смешанной конечно-элементной форме, для исследования вынужденных колебаний пологих осесимметричных ортотропных оболочек вращения.

Исследование НДС заземленной по контуру ортотропной пластинки осуществлено методом начальных функций (МНФ) [34]. При этом отмечается, что для обеспечения устойчивости алгоритма решения необходимо выполнять расчеты с длинной мантисой.

Для изучения упругопластических деформаций нанопластин Кирхгофа авторами статьи [35] разработан вычислительный алгоритм, построенный на применении комплекса численных методов: метода вариационных итераций (расширенный метод Канторовича), метода переменных параметров упругости И.А. Биргера, метода Ньютона для решения алгебраических систем уравнений. Достоверность полученных результатов с использованием данного алгоритма подтверждена сравнением с решениями, полученными другими численными методами.

Интересен подход к определению соотношения мембранных напряжений в тентовых оболочках арочного типа [36], заключающийся в применении итерационного метода хорд.

Для анализа устойчивости цилиндрических панелей авторами публикации [37] предложено использование метода аналоговых уравнений без сетки (МАЕМ). В основе метода лежит принцип аналогового уравнения, заключающийся в преобразовании исходных уравнений перемещений в замещающие.

Ф.С. Хайруллин и О.М. Сахбиев предложили алгоритм расчета прочности толстых и тонких оболочек, в которых появляются упругопластические деформации [38]. В алгоритме использован вариационный принцип Лагранжа, итерационный метод решения нелинейной системы уравнений: в ходе первой итерации осуществляется решение упругой задачи, таким образом система уравнений становится линейной и далее решается методом Холецкого. После проводится проверка условия пластичности и формируется матрица интенсивности деформаций, которая используется на следующей итерации.

С целью изучения волновых процессов в линейно-вязкоупругих оболочках А.В. Нетребко и С.Г. Пшеничнов использовали алгоритм, основанный на интегральном преобразовании Лапласа по времени [39].

Авторами работы [40] предложен численно-аналитический алгоритм решения контактной задачи для цилиндрической оболочки типа Тимошенко. В основе данного алгоритма — метод механических квадратур.

Для исследования гиперупругой пластины в статье [41] представлена математическая модель в виде управляющих уравнений и использован алгоритм, включающий в себя метод бессеточной коллокации (МСМ) и радиальную базисную функцию тонкого сплайна, а также метод продолжения по длине дуги.

Рассмотрены особенности реализации вычислительных алгоритмов, применяемых для исследования мягких оболочек [42]. Выполнен анализ алгоритма, реализующего метод дифференцирования по параметру. Автором предложено руководствоваться методиками экспериментальной механики при проведении численных экспериментов для выявления границ применимости вычислительных алгоритмов.

Авторы статьи [43] отмечают, что для оценки корректности математической модели и вычислительного алгоритма, построенного на использовании численных методов, следует осуществлять проверку их устойчивости к входным параметрам.

Стоит отметить, что значимое количество рассмотренных работ основано на применении вариационных принципов [4, 6, 20, 22, 23, 30, 31, 35, 38, 43].

Исходя из вышепредставленного обзора литературы, можно сделать вывод, что расчетный алгоритм конструкций должен быть рациональным (включать набор процедур, необходимых для получения адекватного решения), высокопроизводительным (время решения задачи по сравнению с иными алгоритмами должно быть минимальным), устойчивым к входным параметрам (размеры конструкции, параметры материала).

Цель данного исследования — разработка вычислительного алгоритма расчета напряженно-деформированного состояния и устойчивости оболочек, построенного на применении метода Ритца и метода Ньютона, обеспечивающего высокую производительность и устойчивость решения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для описания процесса деформирования оболочечной конструкции используется геометрически нелинейная математическая модель типа Тимошенко – Рейсснера, учитывающая поперечные сдвиги, ортотропию, в виде функционала полной потенциальной энергии деформации оболочки [44]:

$$E_s = E_s^0 + E_s^{Cur} + E_s^R, \quad (1)$$

где E_s^0 — функционал полной потенциальной энергии деформации обшивки оболочки; E_s^{Cur} — функционал полной потенциальной энергии деформации зон ослаблений (при наличии вырезов); E_s^R — функционал полной потенциальной энергии деформации ребер (при наличии ребер).

Далее для простоты выкладок будет рассматриваться оболочка без вырезов и ребер. Функционал

полной потенциальной энергии деформации обшивки оболочки имеет вид:

$$E_s^0 = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \left(N_x \varepsilon_x + N_y \varepsilon_y + \frac{1}{2} (N_{xy} + N_{yx}) \gamma_{xy} + M_x \chi_1 + M_y \chi_2 + (M_{xy} + M_{yx}) \chi_{12} + Q_x (\Psi_x - \theta_1) + Q_y (\Psi_y - \theta_2) - 2(P_x U + P_y V + qW) \right) AB dx dy. \quad (2)$$

Все перечисленные переменные подробно представлены в работе [44].

Исследование НДС и устойчивости оболочек сводится к решению вариационной задачи о нахождении минимума функционала (1). Используем метод Ритца: искомые функции перемещений и углов поворота нормали представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} U &= U(x, y) = \sum_{k=1}^{\sqrt{N}} \sum_{l=1}^{\sqrt{N}} U_{kl} X_1^k Y_1^l; \\ V &= V(x, y) = \sum_{k=1}^{\sqrt{N}} \sum_{l=1}^{\sqrt{N}} V_{kl} X_2^k Y_2^l; \\ W &= W(x, y) = \sum_{k=1}^{\sqrt{N}} \sum_{l=1}^{\sqrt{N}} W_{kl} X_3^k Y_3^l; \\ \Psi_x &= \Psi_x(x, y) = \sum_{k=1}^{\sqrt{N}} \sum_{l=1}^{\sqrt{N}} \Psi_{x_{kl}} X_4^k Y_4^l; \\ \Psi_y &= \Psi_y(x, y) = \sum_{k=1}^{\sqrt{N}} \sum_{l=1}^{\sqrt{N}} \Psi_{y_{kl}} X_5^k Y_5^l, \end{aligned} \quad (3)$$

где $U_{kl}, V_{kl}, W_{kl}, \Psi_{x_{kl}}, \Psi_{y_{kl}}$ — неизвестные числовые параметры; X_1^k, \dots, X_5^k и Y_1^l, \dots, Y_5^l — известные аппроксимирующие функции, удовлетворяющие крайевым условиям (назначаются исходя из способа закрепления контура конструкции); N — количество разложений искомых функций в ряды.

В теории оболочек преимущественно применяются аппроксимирующие функции в виде тригонометрических или полиномиальных функций [26, 45, 46]. В качестве аппроксимирующих функций в данном алгоритме приняты тригонометрические функции.

После подстановки функций (3) в функционал (1) находим производные по $U_{kl}, V_{kl}, W_{kl}, \Psi_{x_{kl}}, \Psi_{y_{kl}}$ и полученные выражения приравняем к нулю:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_s}{\partial U_{kl}} = 0; \quad \frac{\partial E_s}{\partial V_{kl}} = 0; \quad \frac{\partial E_s}{\partial W_{kl}} = 0; \\ \frac{\partial E_s}{\partial \Psi_{x_{kl}}} = 0; \quad \frac{\partial E_s}{\partial \Psi_{y_{kl}}} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Получена система нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ), решение которой осуществляется последовательно при разном значении нагрузки методом Ньютона — в начале каждой итерации значение числовых параметров $U_{kl}, V_{kl}, W_{kl}, \Psi_{x_{kl}}, \Psi_{y_{kl}}$ принимается равным значениям, полученным в ходе предыдущей итерации.

Представим полученное решение СНАУ в форме вектора:

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} U_{kl} \\ V_{kl} \\ W_{kl} \\ \Psi_{x_{kl}} \\ \Psi_{y_{kl}} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $k = 1 \dots \sqrt{N}$; $l = 1 \dots \sqrt{N}$. Размерность вектора решения СНАУ (5) равна $5N$.

Рассматривается задача без учета начальных деформаций и несовершенств формы конструкций — начальные значения функций перемещений и углов поворота нормали до приложения нагрузки принимаются равными нулю. Таким образом, вектор решений до начала нагружения примет вид:

$$\tilde{X}_0^0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Условие остановки итерации в методе Ньютона:

$$\left\| \tilde{X}_n^m - \tilde{X}_n^{m-1} \right\| \leq \varepsilon, \quad (7)$$

где \tilde{X}_n^m и \tilde{X}_n^{m-1} — векторы, состоящие из значений числовых параметров, на текущей и предыдущей итерации в методе Ньютона соответственно; $\| \cdot \|$ — норма вектора; n — номер итерации по нагрузке; m — номер итерации в методе Ньютона; ε — точность метода Ньютона (в данном алгоритме принято $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-5}$).

Данная последовательность операций позволяет определить НДС и момент потери устойчивости конструкции при нагружении. Далее будем рассматривать конструкции под действием равномерно распределенной нагрузки q , приложенной по нормали к поверхности оболочки.

В этом алгоритме для установления момента потери устойчивости принят критерий Ляпунова (малому изменению значения входного параметра соответствует большое изменение значения выходного параметра). Таким образом, задача сводится к построению и анализу графика зависимости прогиба W от нагрузки q в характерных точках конструкции [45].

На рис. 1 представлена кривая, характеризующая зависимость прогиба от приложенной нагрузки в центре $\left(x = \frac{a_1 + a}{2}, y = \frac{b}{2} \right)$ оболочки. Потеря устойчивости конструкции соответствует переходу в новое равновесное состояние: из точки A в точку B . Следовательно, критическая нагрузка потери устойчивости достигается в точке A .

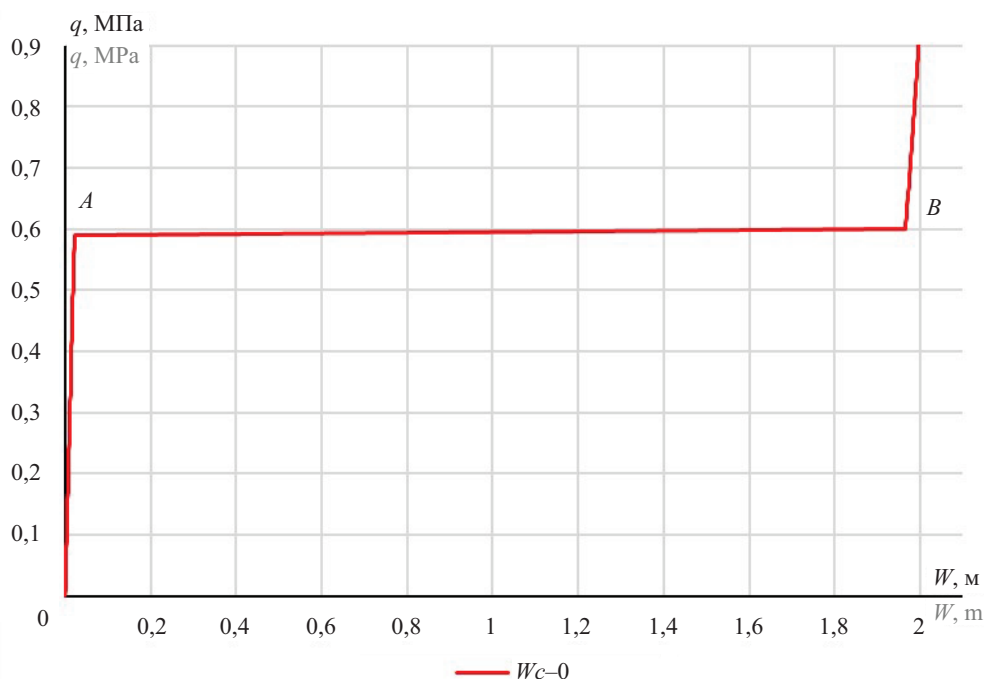


Рис. 1. Кривая прогиб – нагрузка

Fig. 1. Load – deflection curve

Из анализа кривой, представленной на рис. 1, следует, что процесс деформирования оболочечной конструкции характеризуется двумя участками: 1 — условная линейная зависимость функции перемещения от нагрузки; 2 — нелинейная зависимость, в большинстве случаев соответствующая околочкритической зоне.

Очевидно, что для устойчивости вычислительного алгоритма при решении СНАУ и получения точного значения критической нагрузки требуется принимать малое значение шага по нагрузке q . Однако при таком подходе на участках кривых типа 1 получается большое количество решений, не представляющих интерес при исследовании устойчивости оболочки, и, как следствие, существенно увеличивается время выполнения расчета.

Для обеспечения высокой производительности и точности вычислений принят адаптивный шаг по нагрузке: шаг изменяется в зависимости от значения угла между векторами решений СНАУ (для текущего и предыдущего значения нагрузки). Адаптация шага осуществляется следующим образом: если угол между векторами решений меньше значения Δ_1 , то для следующей итерации происходит увеличение шага по нагрузке в Δ_{next} раз. Если угол между векторами решений превышает значение $\Delta_2 = 10\Delta_1$, то происходит уменьшение шага по нагрузке в $\Delta_{previous}$ раз с откатом на предыдущую итерацию и перерасчетом СНАУ.

Реализация алгоритма выполнена в системе компьютерной математики Maple.

Тестовые расчеты производились при значении изменения шага по нагрузке $\Delta_{previous} = \Delta_{next} = 2$. Расчеты проводились на компьютере с 64-разряд-

ной ОС (Windows 10); процессором AMD Ryzen 7 3750H Radeon Vega Mobile Gfx частотой 2,3 ГГц; ОЗУ 32 Гб.

Для отладки алгоритма рассматривались оболочки из материалов, представленных в табл. 1.

С целью выбора интервала значений угла между векторами проведен расчет шарнирно-неподвижно закрепленных оболочек и цилиндрических панелей из стали С345, размеры которых приведены в табл. 2, 3, при $N = 9$. Результаты данных расчетов показаны на рис. 2 (по оси абсцисс использована логарифмическая шкала).

На основании анализа полученных зависимостей на рис. 2 определено, что при минимальном значении угла между векторами решений $\Delta_1 \in [0,001; 0,01]$ изменение критической нагрузки не превышает 0,004857 %.

Ресурсоемкость алгоритма, представленная в виде зависимости количества пройденных шагов по нагрузке при решении СНАУ от минимального угла между векторами решений Δ_1 , приведена на рис. 3 (по оси абсцисс использована логарифмическая шкала).

Из анализа представленной на рис. 3 зависимости можно сделать вывод: уменьшение принятого для расчета значения угла Δ_1 приводит к увеличению количества шагов по нагрузке q при решении СНАУ — зависимость обратно пропорциональная.

Эффективность вычислительного алгоритма достигается при одновременном обеспечении высокой точности результатов и малом затрачивании вычислительных ресурсов. Для представленного в статье

Табл. 1. Характеристики материалов

Table 1. Characteristics of materials

Характеристика Characteristic	Изотропный Isotropic		Ортотропный Orthotropic		
	Сталь С345 Steel S345	Оргстекло Plexiglass	Материал 2 Material 2	Углепластик Carbon fiber	
				ЛУ-П/ЭНФБ LU-P/ENFB	T300/976
E_1 , МПа E_1 , MPa	$2,1 \cdot 10^5$	$0,03 \cdot 10^5$	$0,2 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^5$
μ_{12}	0,3	0,35	0,1	0,3	0,29
E_2 , МПа E_2 , MPa	$2,1 \cdot 10^5$	$0,03 \cdot 10^5$	$0,4 \cdot 10^5$	$0,97 \cdot 10^4$	$0,97 \cdot 10^4$
G_{12} , МПа G_{12} , MPa	$0,807 \cdot 10^5$	$1,111 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^4$	$0,46 \cdot 10^4$	$0,55 \cdot 10^4$
G_{13} , МПа G_{13} , MPa	$0,807 \cdot 10^5$	$1,111 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^4$	$0,46 \cdot 10^4$	$0,55 \cdot 10^4$
G_{23} , МПа G_{23} , MPa	$0,807 \cdot 10^5$	$1,111 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^4$	$0,46 \cdot 10^4$	$0,33 \cdot 10^4$
Источник / Source	–	–	[47]	[48]	[49]

алгоритма это осуществляется при интервале углов между векторами решений СНАУ: $\Delta_1 = 0,01$, $\Delta_2 = 0,1$.

Для определенного ранее интервала проведены дополнительные расчеты шарнирно-неподвижно закрепленных конструкций (размеры представлены в табл. 2, 3) из изотропных и ортотропных материалов (характеристики приведены в табл. 1) при $N = 9$. Выявлено, что при решении системы уравнений на участках с условно линейной зависимостью перемещений от нагрузки количество итераций в методе Ньютона для достижения заданной точности ε составляет от двух до четырех. При решении системы в околокритических зонах количество итераций в методе Ньютона составляет не менее десяти. Уменьшение шага нагрузки и откат итерационного

процесса по нагрузке в большинстве случаев наблюдались в околокритических зонах.

Таким образом, до уменьшения шага по нагрузке при решении системы в методе Ньютона реализовывается значительное количество итераций, которые не имеют значимости, так как далее идет откат итерации по нагрузке. Вместе с тем данное явление снижает производительность алгоритма. Для устранения этого недостатка в цикл метода Ньютона вводится проверка по углу между векторами решений после десятой итерации — процесс проверки, уменьшения шага по нагрузке, отката итерационного процесса и перерасчета СНАУ аналогичен описанному ранее.

Сравнение производительности алгоритма с проверкой угла между векторами решений в методе Ньютона и без него представлено в табл. 4 при $N = 9$.

Табл. 2. Размеры пологих оболочек двоякой кривизны

Table 2. Dimensions of the shallow shells of double curvature

Номер / Number	h , м / m	a , м / m	b , м / m	R_1 , м / m	R_2 , м / m
1.1	0,00022	0,2	0,2	5	3,33
1.2	0,09	18	18	45,27	45,27
1.3	0,09	10,8	10,8	40,05	40,05
1.4	0,045	27	27	67,95	67,95
1.5	0,06	36	36	22,65	22,65

Табл. 3. Размеры цилиндрических панелей

Table 3. Dimensions of cylindrical panels

Номер / Number	h , м / m	a , м / m	b , рад / rad	R_1 , м / m	R_2 , м / m
2.1	0,08	16	1	∞	16
2.2	0,01	10	π	∞	5,4
2.3	0,01	20	π	∞	5,4

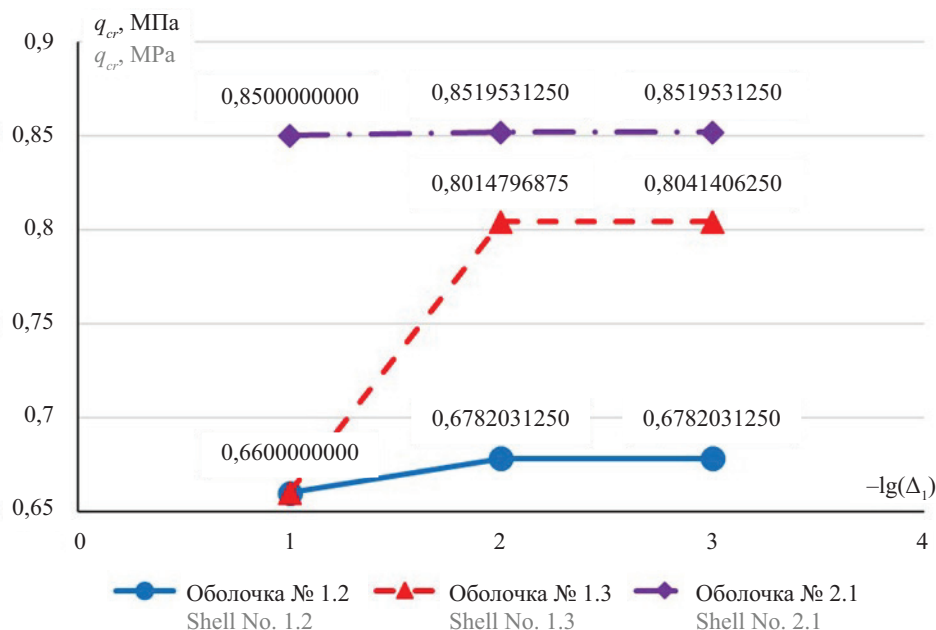


Рис. 2. Зависимость критической нагрузки от Δ_1

Fig. 2. Dependence of the critical load on Δ_1

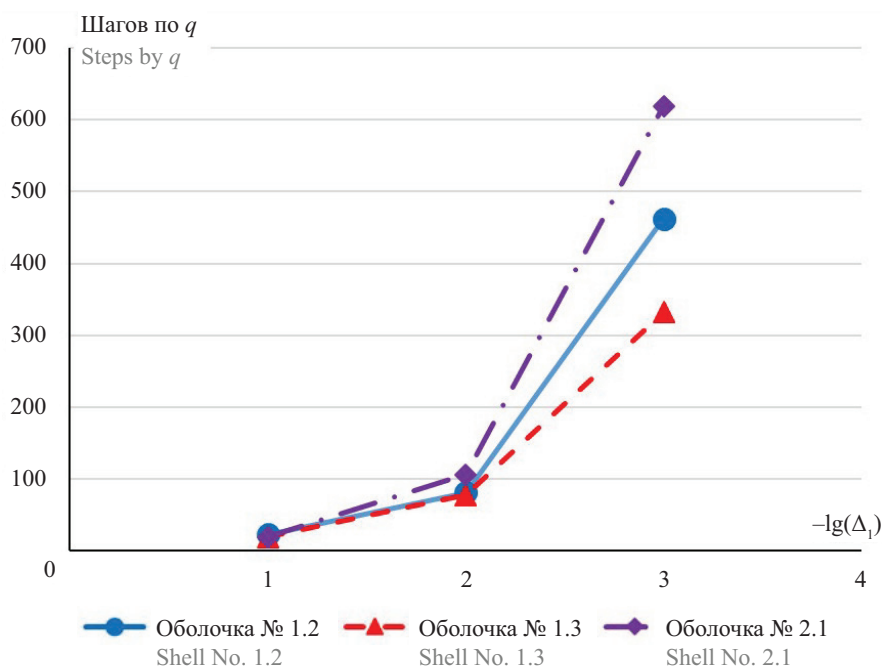


Рис. 3. Ресурсоемкость алгоритма

Fig. 3. Resource intensity of the algorithm

Проверка угла между векторами решений системы в методе Ньютона не оказывает влияния на точность решения, но повышает производительность алгоритма, так как уменьшается количество итераций в методе Ньютона и, как следствие, уменьшается время решения СНАУ: сокращение времени решения составило от 8 до 77,8 %.

Следует отметить, что в околокритических зонах на определенной итерации по нагрузке происходит несколько идущих подряд уменьшений ша-

гов по нагрузке, откатов итераций и перерасчетов СНАУ, что увеличивает общее время расчета задачи. Для исключения выполнения избыточных вычислений при откатах итераций осуществим подбор значения изменения шага по нагрузке $\Delta_{previous} = 2^{Degree}$ (*Degree* — степень) при $\Delta_{next} = 2^1 = 2$. Таким образом, получится исключить выполнение лишних откатов по нагрузке и при этом, в случае необходимости, нивелировать уменьшение шага по нагрузке на следующей итерации. Результаты вычислений представ-

Табл. 4. Производительность алгоритма

Table 4. Algorithm performance

Проверка в методе Ньютона Verification in Newton's method	q_{cr} , МПа MPa	Шагов по q Steps by q	Количество откатов шага по q Number of step rollbacks by q	Максимальное количество откатов по q в итерации Maximum number of rollbacks by q in iteration	Количество циклов метода Ньютона Number of cycles of Newton's method	Время решения системы, мин Time to solve the system, min	Сокращение времени решения, % Reduction in solution time, %
<i>Оболочка № 1.2 Сталь С345 Shell No. 1.2 Steel S345</i>							
Не выполняется Not implemented	0,6783	72	28	3	6936	99,84	77,8
Выполняется In progress		41	12	3	1597	22,19	
<i>Оболочка № 1.3 Сталь С345 Shell No. 1.3 Steel S345</i>							
Не выполняется Not implemented	0,8042	44	15	3	2367	33,87	8
Выполняется In progress		66	26	5	1840	31,15	
<i>Оболочка № 1.4 ЛУ-П/ЭНФБ Shell No. 1.4 LU-P/ENFB</i>							
Не выполняется Not implemented	0,0147	53	15	4	1968	25,15	69,3
Выполняется In progress		73	15	4	643	7,71	
<i>Оболочка № 2.1 Сталь С345 Shell No. 2.1 Steel S345</i>							
Не выполняется Not implemented	0,8520	52	14	3	3115	13,46	68,8
Выполняется In progress		52	14	3	1039	4,2	
<i>Оболочка № 2.1 Оргстекло Shell No. 2.1 Plexiglass</i>							
Не выполняется Not implemented	0,0121	54	13	4	1962	8,24	10,5
Выполняется In progress		74	27	6	1753	7,37	

Табл. 5. Подбор $\Delta_{previous}$

Table 5. Selection $\Delta_{previous}$

Степень Degree	2^{Degree}	q_{cr} , МПа MPa	Шагов по q Steps by q	Максимальное количество откатов по q в итерации Maximum number of rollbacks by q in iteration	Количество циклов метода Ньютона Number of cycles of Newton's method	Время решения системы, мин Time to solve the system, min	Изменение времени решения, % Change in solution time, %
<i>Оболочка № 1.2 Сталь С345 Shell No. 1.2 Steel S345</i>							
2	4	0,6783	46	2	318	4,32	-80,5
3	8	0,6782	76	2	3640	49,06	121,1
4	16	0,6782	84	1	1717	22,30	0,5

Степень Degree	2^{Degree}	q_{cr} , МПа МПа	Шагов по q Steps by q	Максимальное количество откатов по q в итерации Maximum number of rollbacks by q in iteration	Количество циклов метода Ньютона Number of cycles of Newton's method	Время решения системы, мин Time to solve the system, min	Изменение времени решения, % Change in solution time, %
<i>Оболочка № 1.3 Сталь С345 Shell No. 1.3 Steel S345</i>							
2	4	0,8042	98	2	2129	37,72	21,1
3	8	0,8042	73	1	757	11,26	-63,9
4	16	0,8042	80	1	1406	25,04	-19,6
<i>Оболочка № 1.4 ЛУ-П/ЭНФБ Shell No. 1.4 LU-P/ENFB</i>							
2	4	0,0147	74	2	339	5,36	-30,5
3	8	0,0147	82	1	375	5,13	-33,4
4	16	0,0147	104	1	601	8,33	8
<i>Оболочка № 2.1 Сталь С345 Shell No. 2.1 Steel S345</i>							
2	4	0,8520	64	2	650	2,74	-34,8
3	8	0,8520	76	1	338	1,44	-65,7
4	16	0,8520	71	1	530	2,28	-45,9
<i>Оболочка № 2.1 Оргстекло Shell No. 2.1 Plexiglass</i>							
2	4	0,0121	106	3	1483	6,13	-16,8
3	8	0,0121	124	2	1178	4,96	-32,8
4	16	0,0121	96	1	537	2,26	-69,4

лены в табл. 5. Под изменением времени решения в табл. 5 подразумевается разница между временем решения СНАУ при $\Delta_{previous} = 2^1$ и $\Delta_{previous} = 2^{Degree}$ в процентах (знак минус обозначает уменьшение времени).

Из полученных в табл. 5 результатов можно выделить $\Delta_{previous} = 2^3 = 8$ и $\Delta_{previous} = 2^4 = 16$ для данных значений отмечено наибольшее снижение времени решения СНАУ: для $Degree = 3$ сокращение составило от 32,8 до 65,7 %, для $Degree = 4$ — от 19,6 до 69,4 %. При этом выбор параметра $Degree$ не оказывает существенного влияния на величину критич-

еской нагрузки. Необходимо отметить, что среди выделенных значений $\Delta_{previous}$ нет однозначно лучшего параметра, так как лучшее решение (относительно затраченного времени) было получено при разных степенях 2 в зависимости от рассчитываемой конструкции. Вместе с тем при $\Delta_{previous} = 2^3 = 8$ для оболочки № 1.2 время решения СНАУ увеличилось на 121 %, при $\Delta_{previous} = 2^4 = 16$ для оболочки № 1.4 увеличение времени решения составило 8 %.

Итоговые параметры вычислительного алгоритма, принятые для последующих вычислений, приведены в табл. 6.

Табл. 6. Параметры алгоритма

Table 6. Algorithm parameters

Номер Number	Параметр Parameter	Значение Meaning
1	Минимальный угол между векторами решений Minimum angle between solution vectors	$\Delta_1 = 0,01$
2	Максимальный угол между векторами решений Maximum angle between solution vectors	$\Delta_2 = 0,1$
3	Уменьшение шага по нагрузке Step reduction by load	$\Delta_{previous} = 2^4 = 16$
4	Увеличение шага по нагрузке Increase step by load	$\Delta_{next} = 2^1 = 2$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполнены расчеты шарнирно-неподвижно закрепленных по контуру оболочек из материалов, представленных в табл. 1.

Рассматривались пологие оболочки двойкой кривизны и цилиндрические панели, геометриче-

ские параметры рассчитываемых конструкций приведены в табл. 2, 3 соответственно.

Нагрузка — статическая, равномерно распределенная по нормали к поверхности.

Количество разложений искомым функций в ряды в методе Ритца $N = 16$.

Табл. 7. Результаты расчетов пологих оболочек двойкой кривизны

Table 7. Doubly-curved shallow shells calculation results

Номер Number	Материал Material	D. H. van Campen и др. [47] D. H. van Campen et al. [47]		X. Wang [50] X. Wang [50]		В.В. Карпов и др. [51] V.V. Karpov et al. [51]	А.А. Семенов [52] A.A. Semenov [52]		Авторские результаты Authors results	
		PSM	AEM	DQM	FEM		МІРНІ MCSBP			
q_{cr} , Па / Pa										
1.1	Материал 2 Material 2	57,86	76,71	50,76	52,89	–	54,35	53,55		
q_{cr} , МПа / MPa										
1.2	Сталь С345 Steel S345	–	–	–	–	0,6238	–	0,6149		
1.3		–	–	–	–	0,8023	–	0,8010		
1.4	ЛУ-П/ЭНФБ LU-P/ENFB	–	–	–	–	–	0,013	0,0126		
1.5	T300/976	–	–	–	–	–	0,586	0,5813		

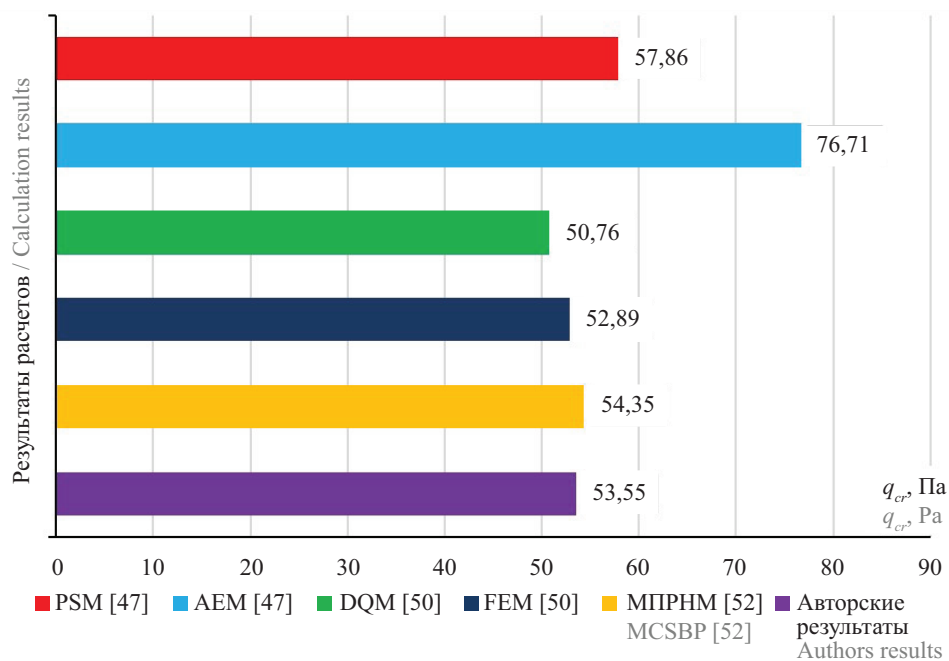


Рис. 4. Результаты расчетов оболочки вариант № 1.1

Fig. 4. Calculation results of the shell option No. 1.1

Табл. 8. Результаты расчетов цилиндрических панелей

Table 8. Calculation results of cylindrical panels

Номер Number	Материал Material	А.А. Семенов [52] A.A. Semenov [52]	Д.С. Петров и др. [53] D.S. Petrov et al. [53]	Авторские результаты Authors results
		МПРНП / MCSBP	ANSYS	
q_{cr} , МПа / MPa				
2.1	Сталь С345 Steel S345	–	0,6562	0,67469
	Оргстекло Plexiglass	–	0,0105	0,00979
2.2	ЛУ-П/ЭНФБ LU-P/ENFB	0,443	–	0,43572
	Т300/976	0,465	–	0,45770
2.3	ЛУ-П/ЭНФБ LU-P/ENFB	0,632	–	0,62362
	Т300/976	0,566	–	0,56120

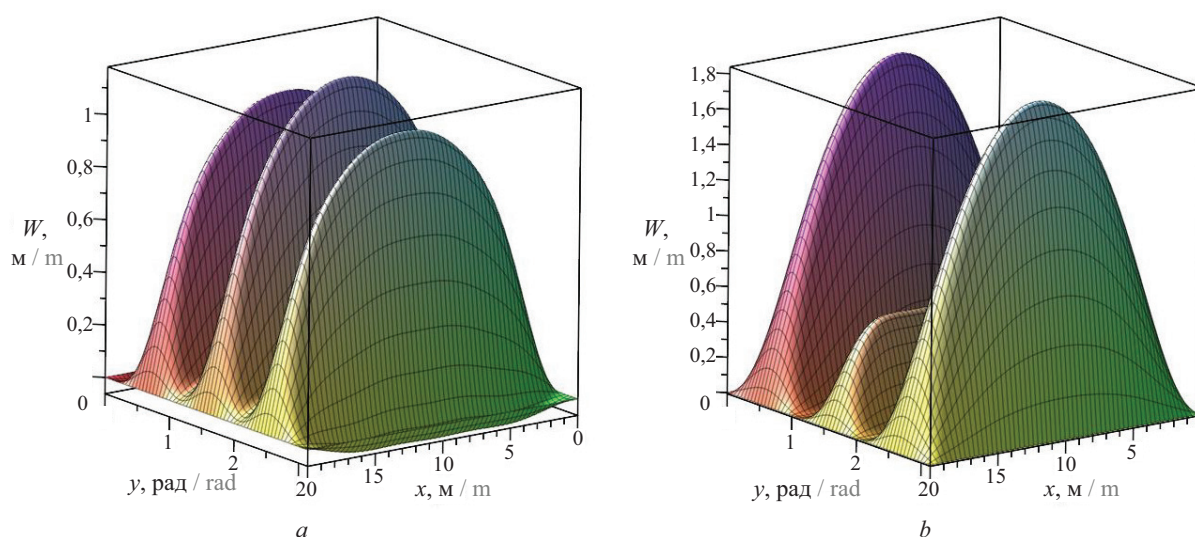


Рис. 5. Поля прогибов цилиндрической панели вариант № 2.3 (Т300/976)

Fig. 5. Deflection fields of a cylindrical panel option No. 2.3 (T300/976)

Значения критических нагрузок потери устойчивости q_{cr} представлены в табл. 7, 8.

Для оболочки вариант № 1.1 значения критических нагрузок, полученные в ходе данной работы, а также другими авторами [47, 50, 52, 53], представлены на рис. 4.

Из представленных в табл. 7 и на рис. 4 результатов можно сделать вывод, что разработанный вычислительный алгоритм позволяет достоверно определить критические нагрузки потери устойчивости пологих оболочек двойной кривизны. Это подтверждается сходимостью вычисленных критических нагрузок с результатами других авторов: расхождение результатов для конструкций из изотропных материалов не превышает 1,49 %, а для оболочек из ортотропных материалов не превышает 8,05 %.

При расчете цилиндрических панелей получены значения критических нагрузок, сопоставимые со значениями, полученными другими авторами:

расхождение результатов для панелей из изотропных материалов от 2,74 до 7,29 %; из ортотропных материалов от 0,85 до 1,67 %. На основании чего можно сделать вывод о применимости разработанного алгоритма для расчета цилиндрических панелей.

На рис. 5 показаны поля прогибов цилиндрической панели вариант № 2.3 из углепластика Т300/976. На рис. 5, а — поле до потери устойчивости при нагрузке $q = 0,62362$ МПа, на рис. 5, б — после потери устойчивости при нагрузке $q = 0,62363$ МПа.

Деформирование цилиндрической панели (на рис. 5) до потери устойчивости характеризуется наибольшим нарастанием прогибов в центре и четвертях конструкции. Максимальное значение прогиба наблюдается в центре панели. После потери устойчивости общий характер деформирования (экстремумы в центре и четвертях) сохранился, однако максимальные значения прогибов зафиксированы в четвертях конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанный вычислительный алгоритм оказался устойчивым к изменению геометрии и материала конструкции. При этом данный алгоритм пригоден для исследования НДС и устойчивости как пологих оболочек двойкой кривизны, так и цилиндрических панелей.

Высокая производительность алгоритма обеспечивается за счет учета процесса деформирования

рассматриваемых тонкостенных конструкций (учитывается характер кривой равновесных состояний) в виде адаптивного изменения шага по нагрузке в ходе расчета конструкции и ограничения выполняемых итераций в методе Ньютона при решении системы нелинейных уравнений.

Данный алгоритм может быть использован для исследования НДС и устойчивости оболочек иной геометрии, а также для конструкций переменной толщины (оболочки с ребрами и/или вырезами).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Соколов В.Г., Разов И.О., Вольнец С.И. Исследование свободных колебаний тонкостенных прямолинейных газопроводов большого диаметра при полуподземной прокладке // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6 (77). С. 149–156. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-5-149-156. EDN EGOGDV.
2. Гришин И.В., Каюмов Р.А. Упрощенное уравнение многослойной плиты для описания работы асфальтобетонных покрытий металлических мостов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. № 4 (62). С. 119–128. DOI: 10.52409/20731523_20224119. EDN FDJBZY.
3. Василькин А.А. Управление поведением вертикального стального резервуара в период эксплуатации // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. № 4 (79). С. 66–74. DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-4-66-74. EDN YQVOJN.
4. Vescovini R., Oliveri V., Pizzi D., Dozio L., Weaver P.M. A semi-analytical approach for the analysis of variable-stiffness panels with curvilinear stiffeners // International Journal of Solids and Structures. 2020. Vol. 188–189. Pp. 244–260. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2019.10.011
5. Кузнецова В.О. К вопросу учета кинетики наводороживания на предельное состояние сферических оболочек из титанового сплава // Строительные конструкции, здания и сооружения. 2024. № 2 (7). С. 4–14. EDN SZJYCD.
6. Железнов Л.П. Нелинейное деформирование и устойчивость композитной цилиндрической оболочки при комбинированном нагружении изгибающим моментом и краевой поперечной силой // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 8 (749). С. 84–95. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-8-84-95. EDN XAAWGI.
7. Тумашик Г.А., Фрумен А.И. Исследование статической и динамической прочности цилиндрической оболочки, контактирующей с круговой диафрагмой // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 5. С. 192–196. EDN PIGEEH.
8. Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Моделирование и оптимальное проектирование круглых пластинок, взаимодействующих с агрессивными средами : монография. Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2023. 198 с. EDN QZDQRC.
9. Ghaiasvand A., Rashid H.A. Numerical and experimental analysis of buckling and post buckling in cylindrical shells with circular cutout // Computations and Simulations in Mechanical Science. 2018. Vol. 1. Issue 2. Pp. 24–28.
10. Турков А.В., Полешко С.И. Исследование прогибов и частот собственных колебаний круглых изотропных пластин переменной толщины по закону квадратной параболы с утолщением на опоре // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 8. С. 1212–1219. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1212-1219. EDN MKTADU.
11. Пятикрестовский К.П., Трауш В.И. Экспериментальные исследования характера НДС фанерных обшивок в составе пространственных конструкций // Известия Юго-Западного государственного университета. 2015. № 5 (62). С. 36–42. EDN VHNOAJ.
12. Dewangan H.Ch., Panda S.K. Nonlinear Thermoelastic Numerical Frequency Analysis and Experimental Verification of Cutout Abided Laminated Shallow Shell Structure // Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME. 2022. Vol. 144. No. 6. DOI: 10.1115/1.4054843. EDN AQYBRW.
13. Jiao P., Chen Z., Xu F., Tang X., Su W. Effects of ringed stiffener on the buckling behavior of cylindrical shells with cutout under axial compression: Experimental and numerical investigation // Thin-Walled Structures. 2018. Vol. 123. Pp. 232–243. DOI: 10.1016/j.tws.2017.11.013
14. Бауэр С.М., Венатовская Л.А., Воронкова Е.Б. Модели механики деформируемого тела в задачах офтальмологии // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2023.

Т. 10. № 4. С. 686–712. DOI: 10.21638/spbu01.2023.407. EDN UJNCGP.

15. *Трецев А.А.* О механических испытаниях тонкостенных цилиндрических оболочек из композитных материалов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 7. С. 90–97. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-7-90-91. EDN ANDSZH.

16. *Петров В.В.* Расчет неоднородных по толщине оболочек с учетом физической и геометрической нелинейностей // Academia. Архитектура и строительство. 2016. № 1. С. 112–117. EDN VNRSEV.

17. *Кривошапко С.Н., Алёшина О.О., Иванов В.Н.* Статический расчет оболочек, очерченных по поверхностям с главным каркасом из трех заданных суперэллипсов // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 6 (305). С. 18–27. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.6.18.27. EDN DIBIMW.

18. *Li Sh.Ch., Zhang Yu.Ch., Chang Le., Zhou Ch.Yu., He X.H.* Research on Buckling Load of Cylindrical Shell with an Inclined through Crack under External Pressure and Its Solution // Metals. 2023. Vol. 13. Issue 1. P. 174. DOI: 10.3390/met13010174. EDN YKYTUZ.

19. *Pinto V.T., Rocha L.A. O., Fragassa C., dos Santos E., Isoldi L.A.* Multiobjective Geometric Analysis of Stiffened Plates under Bending through Constructal Design Method // Journal of Applied and Computational Mechanics. 2020. Vol. 6. Pp. 1438–1449. DOI: 10.22055/jacm.2020.35248.2608

20. *Castro S.G.P., Jansen E.L.* Displacement-based formulation of Koiter’s method: Application to multi-modal post-buckling finite element analysis of plates // Thin-Walled Structures. 2021. Vol. 159. P. 107217. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107217

21. *Klochkov Yu.V., Pshenichkina A.P., Nikolaev A.P., Marchenko S.S., Vakhnina O.V., Klochkov M.Yu.* Calculation of Shells of Revolution with the Use of a Mixed FEM with a Vector Approximation Procedure // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2024. Vol. 53. Issue 1. Pp. 10–21. DOI: 10.1134/S1052-618824010059. EDN NHDCXB.

22. *Сагдатуллин М.К.* Численное моделирование процессов нелинейного деформирования оболочек средней толщины // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 2. С. 130–148. DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-2-130-148. EDN KNCSOD.

23. *Каюмов Р.А.* Большие прогибы, потеря устойчивости и закритическое поведение пологих панелей и арок переменной толщины на упругом основании // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2024. № 2. С. 33–41. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.2.04. EDN KFDQBX.

24. *Liew K.M., Lim C.W.* Vibration of perforated doubly-curved shallow shells with rounded corners //

International Journal of Solids and Structures. 1994. Vol. 31. Issue 11. Pp. 1519–1536. DOI: 10.1016/0020-7683(94)90012-4

25. *Young P.G., Yuan J., Dickinson S.M.* Three-Dimensional Analysis of the Free Vibration of Thick Rectangular Plates With Depressions, Grooves or Cut-Outs // Journal of Vibration and Acoustics. 1996. Vol. 118. Issue 2. Pp. 184–189. DOI: 10.1115/1.2889647

26. *Qatu M.S.* Effect of inplane edge constraints on natural frequencies of simply supported doubly curved shallow shells // Thin-Walled Structures. 2011. Vol. 49. Issue 7. Pp. 797–803. DOI: 10.1016/j.tws.2011.01.001. EDN OENDQJ.

27. *Lam K.Y., Hung K.C., Chow S.T.* Vibration analysis of plates with cutouts by the modified Rayleigh-Ritz method // Applied Acoustics. 1989. Vol. 28. Issue 1. Pp. 49–60. DOI: 10.1016/0003-682X(89)90030-3

28. *Aljawhary M.H., Al-Gahtani H.J.* Boundary-type Ritz method for the analysis of arbitrarily shaped polygonal plates // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2021. Vol. 130. Pp. 124–134. DOI: 10.1016/j.enganabound.2021.05.008. EDN XXUFIY.

29. *Milazzo A., Guarino G., Gulizzi V.* Buckling and post-buckling of variable stiffness plates with cutouts by a single-domain Ritz method // Thin-Walled Structures. 2023. Vol. 182. P. 110282. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110282. EDN YXGIOP.

30. *Karpov V.V., Kobelev E.A., Maslennikov A.M., Panin A.N.* Ritz method in the discrete approximation of displacements for slab calculation // Architecture and Engineering. 2023. Vol. 8. Issue 4. Pp. 57–67. DOI: 10.23968/2500-0055-2023-8-4-57-67. EDN FTPEME.

31. *Григолюк Э.И., Лопаницын Е.А.* Влияние осесимметричных начальных неправильностей сферической оболочки на ее критическую нагрузку // Известия МГТУ МАМИ. 2008. № 1 (5). С. 233–246. EDN LDMOJF.

32. *Колесников А.Г., Иванов А.А.* Напряженно-деформированное состояние пологой оболочки на упругом основании с переменными прочностными характеристиками // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023. Т. 27. № 3. С. 21–33. DOI: 10.21869/2223-1560-2023-27-3-21-33. EDN UGXEXY.

33. *Ступишин Л.Ю., Никитин К.Е.* Численное исследование вынужденных колебаний ортотропных геометрически нелинейных пологих оболочек с использованием метода конечных элементов в смешанной форме // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 6. С. 28–33. EDN YUBOMD.

34. *Голоскоков Д.П., Матросов А.В.* Метод начальных функций в расчете изгиба защемленной по контуру тонкой ортотропной пластинки // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2021. Т. 17. № 4. С. 330–344. DOI: 10.21638/11701/spbu10.2021.402. EDN RIFCWU.

35. Тебякин А.Д., Крысько А.В., Жигалов М.В., Крысько В.А. Упругопластическое деформирование нанопластин. Метод вариационных итераций (расширенный метод Канторовича) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2022. Т. 22. № 4. С. 494–505. DOI: 10.18500/1816-9791-2022-22-4-494-505. EDN KFJVBN.
36. Чесноков А.В., Михайлов В.В. Методика определения требуемого соотношения мембранных напряжений в тентовой оболочке арочного типа // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28. № 2. С. 37–55. DOI: 10.21869/2223-1560-2024-28-2-37-55. EDN LCSYWD.
37. Yiotis A.J., Katsikadelis J.T. Buckling of cylindrical shell panels: a MAEM solution // Archive of Applied Mechanics. 2015. Vol. 85. Issue 9–10. Pp. 1545–1557. DOI: 10.1007/s00419-014-0944-9
38. Хайруллин Ф.С., Сахбиев О.М. Упругопластический расчет оболочек вариационным методом на основе полиномов высокой степени // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 4. С. 349–361. DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-4-349-361. EDN WYVDDH.
39. Нетребко А.В., Пшеничников С.Г. Нестационарная динамическая задача для линейно-вязкоупругой цилиндрической оболочки конечной длины // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2014. № 4. С. 63–79. EDN TDVEUR.
40. Okonechnikov A.S., Tarlakovsky D.V., Fedotkin G.V. Spatial Non-Stationary Contact Problem for a Cylindrical Shell and Absolutely Rigid Body // Mechanics of Solids. 2020. Vol. 55. Issue 3. Pp. 366–376. DOI: 10.3103/S0025654420030127. EDN MRHREO.
41. Hosseini S., Rahimi G. Experimental and numerical analysis of hyperelastic plates using Mooney-Rivlin strain energy function and meshless collocation method // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2023. Vol. 150. Pp. 199–218. DOI: 10.1016/j.enganabound.2023.02.024
42. Коровайцева Е.А. О некоторых особенностях решения задач статики мягких оболочек вращения при больших деформациях // Труды МАИ. 2020. № 114. С. 3. DOI: 10.34759/trd-2020-114-04. EDN YYRPAW.
43. Бакусов П.А., Семенов А.А. Анализ устойчивости вычислительного алгоритма к изменению геометрических параметров цилиндрических оболочечных конструкций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2021. № 1. С. 12–21. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.1.02. EDN ZIPFYC.
44. Мишуренко Н.А., Семенов А.А. Устойчивость пологих оболочек двойкой кривизны с учетом наличия дискретно вводимых ослаблений // Известия КГАСУ. 2023. № 3 (65). С. 6–17. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_6. EDN ASJURD.
45. Карпов В.В. Прочность и устойчивость подкрепленных оболочек вращения. Ч. 1. Модели и алгоритмы исследования прочности и устойчивости подкрепленных оболочек вращения. М.: Физматлит, 2010. 285 с.
46. Vescovini R., Dozio L., D'Ottavio M., Polit O. On the application of the Ritz method to free vibration and buckling analysis of highly anisotropic plates // Composite Structures. 2018. Vol. 192. Pp. 460–474. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.03.017
47. Van Campen D.H., Bouwman V.P., Zhang G.Q., Zhang J., ter Weeme B.J.W. Semi-analytical stability analysis of doubly-curved orthotropic shallow panels — considering the effects of boundary conditions // International Journal of Non-Linear Mechanics. 2002. Vol. 37. Issue 4–5. Pp. 659–667. DOI: 10.1016/S00207462(01)-00090-7
48. Смердов А.А., Буянов И.А., Чуднов И.В. Анализ оптимальных сочетаний требований к разрабатываемым углепластикам для крупногабаритных ракетно-космических конструкций // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 8. С. 70–77. EDN PBJFXB.
49. Цепенников М.В., Пovyшев И.А., Сметанников О.Ю. Верификация численной методики расчета разрушения конструкций из композиционных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная математика и механика. 2012. № 10. С. 225–241. EDN PIEZDT.
50. Wang X. Nonlinear stability analysis of thin doubly curved orthotropic shallow shells by the differential quadrature method // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2007. Vol. 196. Issue 17–20. Pp. 2242–2251. DOI: 10.1016/j.cma.2006.11.009. EDN MKDNZV.
51. Karpov V.V., Semenov A.A. Refined model of stiffened shells // International Journal of Solids and Structures. 2020. Vol. 199. Pp. 43–56. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2020.03.019. EDN PNZVAI.
52. Semenov A.A. Strength and stability of geometrically nonlinear orthotropic shell structures // Thin-Walled Structures. 2016. Vol. 106. Pp. 428–436. DOI: 10.1016/j.tws.2016.05.018. EDN WVMNLF.
53. Петров Д.С., Семенов А.А. Анализ устойчивости ортотропной цилиндрической оболочечной конструкции в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 3. С. 618–627. DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-618-627. EDN IIAIEZ.

Поступила в редакцию 16 ноября 2024 г.

Принята в доработанном виде 25 февраля 2025 г.

Одобрена для публикации 24 марта 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Николай Александрович Мишуренко** — аспирант, старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; ведущий инженер архитектурно-инженерного отдела; **ООО «Газпром проектирование»**; 191036, г. Санкт-Петербург, Суворовский пр. 16/13; SPIN-код: 5962-8693, РИНЦ ID: 1122500, ResearcherID: АНВ-4673-2022, ORCID: 0000-0002-0022-734X; nikolai8421@mail.ru;

Алексей Александрович Семенов — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных систем и технологий; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; SPIN-код: 9057-9882, РИНЦ ID: 648893, Scopus: 56460436800, ResearcherID: N-1075-2013, ORCID: 0000-0001-9490-7364; sw.semenov@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Sokolov V.G., Razov I.O., Volynec S.I. Investigation of free oscillations of thin-walled straight-line gas pipe lines of large diameter at semi-underground laying. *Bulletin of civil engineers*. 2019; 6(77):149-156. P. 149–156. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-5-149-156. EDN EGOGDV. (rus.).
2. Grishin I.V., Kayumov R.A. Simplified multilayered slab equation describing asphalt concrete pavements of metal bridges. *News KSUAE*. 2022; 4(62):119-128. DOI: 10.52409/20731523_20224119. EDN FDJBZY. (rus.).
3. Vasilkin A.A. Control of Actions of Steel Tank in Working. *Proceedings of the Southwest State University*. 2018; 4(79):66-74. DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-4-66-74. EDN YQVOJN. (rus.).
4. Vescovini R., Oliveri V., Pizzi D., Dozio L., Weaver P.M. A semi-analytical approach for the analysis of variable-stiffness panels with curvilinear stiffeners. *International Journal of Solids and Structures*. 2020; 188-189:244-260. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2019.10.011
5. Kuznetsova V.O. On the issue of taking into account the kinetics of hydrogenation on the limiting state of spherical shells made of titanium alloy. *Construction, Buildings and Structures*. 2024; 2(7):4-14. EDN SZJYCD. (rus.).
6. Zhelezov L.P. Nonlinear Deformation and Stability of a Composite Cylindrical Shell under a Combined Loading by a Bending Moment and an Edge Transverse Force. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2022; 8(749):84-95. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-8-84-95. EDN XAAWGI. (rus.).
7. Tumashik G.A., Frumen A.I. Study of static and dynamic strength of a cylindrical shell in contact with a circular diaphragm. *Aerospace MAI Journal*. 2012; 19(5):192-196. EDN PIGEEH. (rus.).
8. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G. *Modeling and optimal design of circular plates interacting with aggressive environments*. Tyumen, Industrial University of Tyumen, 2023; 198. EDN QZDQRC. (rus.).
9. Ghaiasvand A., Rashid H.A. Numerical and experimental analysis of buckling and post buckling in cylindrical shells with circular cutout. *Computations and Simulations in Mechanical Science*. 2018; 1(2):24-28.
10. Turkov A.V., Poleshko S.I. Investigation of deflections and natural vibration frequencies of circular isotropic plates of variable thickness according to the law of square parabola with thickening to the support. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(8):1212-1219. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1212-1219. EDN MKTADU. (rus.).
11. Pyatikrestovskiy K.P., Travush V.I. Experimental studies on the nature of the VAT plywood sheathing as part of spatial structures. *Proceedings of the Southwest State University*. 2015; 5(62):36-42. EDN VHNOAJ. (rus.).
12. Dewangan H.Ch., Panda S.K. Nonlinear Thermoelastic Numerical Frequency Analysis and Experimental Verification of Cutout Abided Laminated Shallow Shell Structure. *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME*. 2022; 144(6). DOI: 10.1115/1.4054843. EDN AQYBRW.
13. Jiao P., Chen Z., Xu F., Tang X., Su W. Effects of ringed stiffener on the buckling behavior of cylindrical shells with cutout under axial compression: Experimental and numerical investigation. *Thin-Walled Structures*. 2018; 123:232-243. DOI: 10.1016/j.tws.2017.11.013
14. Bauer S.M., Venatovskaya L.A., Voronkova E.B. Solid mechanics models in application to ophthalmology. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*. 2023; 10(4):686-712. DOI: 10.21638/spbu01.2023.407. EDN UJNCGP. (rus.).
15. Treshchev A.A. About mechanical tests of thin-walled cylindrical shells made of composite materials. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2023; 7:90-97. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-7-90-91. EDN ANDSZH. (rus.).
16. Petrov V.V. Calculation of Inhomogeneous Thickness of Shells with Considering Physical and Geometrical Nonlinearities. *Academia. Architecture and Construction*. 2016; 1:112-117. EDN VNRSEV. (rus.).

17. Krivoshapko S.N., Aleshina O.O., Ivanov V.N. Static analysis of shells with middle surfaces containing the main frame from three given superellipses. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2022; 6(305):18-27. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.6.18.27. EDN DIBIMW. (rus.).
18. Li Sh.Ch., Zhang Yu.Ch., Chang Le., Zhou Ch.Yu., He X.H. Research on Buckling Load of Cylindrical Shell with an Inclined through Crack under External Pressure and Its Solution. *Metals*. 2023; 13(1):174. DOI: 10.3390/met13010174. EDN YKYTUZ.
19. Pinto V.T., Rocha L.A. O., Fragassa C., dos Santos E., Isoldi L.A. Multiobjective Geometric Analysis of Stiffened Plates under Bending through Constructal Design Method. *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 2020; 6:1438-1449. DOI: 10.22055/jacm.2020.35248.2608
20. Castro S.G.P., Jansen E.L. Displacement-based formulation of Koiter's method: Application to multi-modal post-buckling finite element analysis of plates. *Thin-Walled Structures*. 2021; 159:107217. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107217
21. Klochkov Yu.V., Pshenichkina A.P., Nikolaev A.P., Marchenko S.S., Vakhnina O.V., Klochkov M.Yu. Calculation of Shells of Revolution with the Use of a Mixed FEM with a Vector Approximation Procedure. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2024; 53(1):10-21. DOI: 10.1134/S1052618824010059. EDN HHDCXB.
22. Sagdatullin M.K. Numerical modeling of non-linear deformation processes for shells of medium thickness. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023; 19(2):130-148. DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-2-130-148. EDN KNCSOD. (rus.).
23. Kayumov R.A. Large deflections, loss of stability and over-critical behavior of sloping panels and arches of variable thickness on an elastic base. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2024; 2:33-41. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.2.04. EDN KFDQBX. (rus.).
24. Liew K.M., Lim C.W. Vibration of perforated doubly-curved shallow shells with rounded corners. *International Journal of Solids and Structures*. 1994; 31(11):1519-1536. DOI: 10.1016/0020-7683(94)90012-4
25. Young P.G., Yuan J., Dickinson S.M. Three-Dimensional Analysis of the Free Vibration of Thick Rectangular Plates With Depressions, Grooves or Cut-Outs. *Journal of Vibration and Acoustics*. 1996; 118(2):184-189. DOI: 10.1115/1.2889647
26. Qatu M.S. Effect of inplane edge constraints on natural frequencies of simply supported doubly curved shallow shells. *Thin-Walled Structures*. 2011; 49(7):797-803. DOI: 10.1016/j.tws.2011.01.001. EDN OENDQJ.
27. Lam K.Y., Hung K.C., Chow S.T. Vibration analysis of plates with cutouts by the modified Rayleigh-Ritz method. *Applied Acoustics*. 1989; 28(1):49-60. DOI: 10.1016/0003-682X(89)90030-3
28. Aljawhary M.H., Al-Gahtani H.J. Boundary-type Ritz method for the analysis of arbitrarily shaped polygonal plates. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2021; 130:124-134. DOI: 10.1016/j.engabound.2021.05.008. EDN XXUFUY.
29. Milazzo A., Guarino G., Gulizzi V. Buckling and post-buckling of variable stiffness plates with cutouts by a single-domain Ritz method. *Thin-Walled Structures*. 2023; 182:110282. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110282. EDN YXGIOP.
30. Karpov V.V., Kobelev E.A., Maslennikov A.M., Panin A.N. Ritz method in the discrete approximation of displacements for slab calculation. *Architecture and Engineering*. 2023; 8(4):57-67. DOI: 10.23968/2500-0055-2023-8-4-57-67. EDN FTPEME.
31. Grigolyuk E., Lopanitsyn E. Influence of axisymmetric initial imperfections of a spherical shell on its critical load. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2008; 1(5):233-246. EDN LDMOJF. (rus.).
32. Kolesnikov A.G., Ivanov A.A. Stress-Strain State of Shallow Shell in an Elastic Foundation with Variable Strength Characteristics. *Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(3):21-33. DOI: 10.21869/2223-1560-2023-27-3-21-33. EDN UGXKEY. (rus.).
33. Stupishin L.Yu., Nikitin K.Ye. Numerical Investigation of Forced Oscillations of Orthotropic Geometrically Non-linear Shallow Shells with the Use of the Finite Element Method in Mixed Form. *Industrial and Civil Engineering*. 2017; 6:28-33. EDN YUBOMD. (rus.).
34. Goloskokov D.P., Matrosov A.V. Method of initial functions in analyses of the bending of a thin orthotropic plate clamped along the contour. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*. 2021; 17(4):330-344. DOI: 10.21638/11701/spbu10.2021.402. EDN RIFCWU. (rus.).
35. Tebyakin A.D., Krysko A.V., Zhigalov M.V., Krysko V.A. Elastic-plastic deformation of nanoplates. The method of variational iterations (extended Kantorovich method). *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*. 2022; 22(4):494-505. DOI: 10.18500/1816-9791-2022-22-4-494-505. EDN KFJVBH. (rus.).
36. Chesnokov A.V., Mikhailov V.V. Technique for obtaining the membrane stress ratio in a fabric arch-type shell. *Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(2):37-55. DOI: 10.21869/2223-1560-2024-28-2-37-55. EDN LCSYWD. (rus.).
37. Yiotis A.J., Katsikadelis J.T. Buckling of cylindrical shell panels: a MAEM solution. *Archive of Applied Mechanics*. 2015; 85(9-10):1545-1557. DOI: 10.1007/s00419-014-0944-9
38. Khayrullin F.S., Sakhbiev O.M. Elastic-plastic analysis of shells by variational method on the basis of high-degree polynomials. *Structural Mechanics*

of *Engineering Constructions and Buildings*. 2023; 19(4):349-361. DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-4-349-361. EDN WYVDDH. (rus.).

39. Netrebko A.V., Pshenichnov S.G. Nonstationary dynamic problem for visco-elastic cylindrical finite length shell. *Izvestiya Tula State University. Natural Sciences*. 2014; 4:63-79. EDN TDVEUR. (rus.).

40. Okonechnikov A.S., Tarlakovsky D.V., Fedotenkov G.V. Spatial Non-Stationary Contact Problem for a Cylindrical Shell and Absolutely Rigid Body. *Mechanics of Solids*. 2020; 55(3):366-376. DOI: 10.3103/S0025654420030127. EDN MRHREO.

41. Hosseini S., Rahimi G. Experimental and numerical analysis of hyperelastic plates using Mooney-Rivlin strain energy function and meshless collocation method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2023; 150:199-218. DOI: 10.1016/j.engabound.2023.02.024

42. Korovaytseva E.A. On some features of soft shells of revolution static problems solution at large deformations. *Trudy MAI*. 2020; 114:3. DOI: 10.34759/trd-2020-114-04. EDN YYRPAW. (rus.).

43. Bakusov P.A., Semenov A.A. Analysis of the stability of the computational algorithm to a change in the geometric parameters of cylindrical shell structures. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2021; 1:12-21. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.1.02. EDN ZIPFYC. (rus.).

44. Mishurenko N.A., Semenov A.A. Buckling of shallow shells of double curvature considering the presence of discretely introduced weakenings. *News KSUAE*. 2023; 3(65):6-17. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_6. EDN ASJURD. (rus.).

45. Karpov V.V. The strength and stability of reinforced shells of revolution. Part 1. *Models and algorithms of research of the strength and stability of supported shells of revolution*. Moscow, Fizmatlit, 2010; 285. (rus.).

46. Vescovini R., Dozio L., D'Ottavio M., Polit O. On the application of the Ritz method to free vibration and buckling analysis of highly anisotropic plates. *Com-*

posite Structures. 2018; 192:460-474. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.03.017

47. Van Campen D.H., Bouwman V.P., Zhang G.Q., Zhang J., ter Weeme B.J.W. Semi-analytical stability analysis of doubly-curved orthotropic shallow panels — considering the effects of boundary conditions. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2002; 37(4-5):659-667. DOI: 10.1016/S0020-7462(01)00090-7

48. Smerdov A.A., Buyanov I.A., Chudnov I.V. Analysis of optimal combinations of requirements to developed CFRP for large space-rocket designs. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2012; 8:70-77. EDN PBJFXB. (rus.).

49. Tsepennikov M.B., Povyshev I.A., Smetanikov O.Yu. Verification of numerical technique for composite structures failure modeling. Perm National Research Polytechnic University Bulletin. *Applied Mathematics and Mechanics*. 2012; 10:225-241. EDN PIEZDT. (rus.).

50. Wang X. Nonlinear stability analysis of thin doubly curved orthotropic shallow shells by the differential quadrature method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2007; 196(17-20):2242-2251. DOI: 10.1016/j.cma.2006.11.009. EDN MKDNZV.

51. Karpov V.V., Semenov A.A. Refined model of stiffened shells. *International Journal of Solids and Structures*. 2020; 199:43-56. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2020.03.019. EDN PNZVAI.

52. Semenov A.A. Strength and stability of geometrically nonlinear orthotropic shell structures. *Thin-Walled Structures*. 2016; 106:428-436. DOI: 10.1016/j.tws.2016.05.018. EDN WVMNLF.

53. Petrov D.S., Semenov A.A. Buckling analysis of an orthotropic cylindrical shell structure in the ANSYS Mechanical APDL software package. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2023; 23(3):618-627. DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-618-627. EDN IIAIEZ. (rus.).

Received November 16, 2024.

Adopted in revised form on February 25, 2025.

Approved for publication on March 24, 2025.

B I O N O T E S: **Nikolai A. Mishurenko** — postgraduate student, senior lecturer of the Department of Information Systems and Technologies; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; **LLC “Gazprom proektirovanie”**; 16/13 Suvorovsky ave., Saint Petersburg, 191036, Russian Federation; SPIN-code: 5962-8693, ID RSCI: 1122500, ResearcherID: AHB-4673-2022, ORCID: 0000-0002-0022-734X; nikolai8421@mail.ru;

Alexey A. Semenov — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Information Systems and Technologies; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; SPIN-code: 9057-9882, ID RSCI: 648893, Scopus: 56460436800, ResearcherID: N-1075-2013, ORCID: 0000-0001-9490-7364; sw.semenov@gmail.com.

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 69.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.867-887

Методика расчета плит на продавливание, построенная с использованием регрессионного анализа

Александр Михайлович Бударин¹, Олег Юрьевич Ушаков², Линар Салихзанович
Сабитов³, Левон Рафаэлович Маилян⁴, Сергей Сергеевич Сосновских¹

¹ Институт «Гидропроект»; г. Москва, Россия;

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ);
г. Екатеринбург, Россия;

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

⁴ Донской государственный технический университет (ДГТУ); г. Ростов-на-Дону, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В местах сопряжения плитных и вертикальных железобетонных конструкций, где значительная сила сконцентрирована на относительно небольшой площади опоры, возможно разрушение плиты от продавливания. Данный тип разрушения сопровождается образованием пространственной поверхности разрушения, формируемой сетью трещин и называемой пирамидой продавливания. К основным факторам, оказывающим влияние на несущую способность плиты при продавливании, можно отнести: масштабный энергетический эффект, процент продольного армирования растянутой зоны плиты, относительный пролет среза плиты, отношение периметра опоры к рабочей высоте плиты. Отсутствие учета этих факторов в методике вычисления предельного продавливающего усилия, воспринимаемого плитой, ведет к ухудшению ее точности. Цель исследования — разработка методики расчета железобетонных плит на продавливание, учитывающей основные факторы, влияющие на несущую способность плиты.

Материалы и методы. Представлено сравнение величин предельного продавливающего усилия, полученного в рамках лабораторных испытаний и с помощью отечественного (СП 63.13330) и зарубежных нормативных документов (Eurocode 2, ACI 318-11, Model Code 2010). Актуальной является задача разработки более точной методики расчета плит на продавливание. Коэффициенты методики получены с помощью регрессионного анализа методом наименьших квадратов с использованием алгоритма Левенберга – Марквардта на основании опытных данных.

Результаты. В результате выполнения регрессионного анализа получена методика расчета на продавливание. Приведено сравнение величин предельного продавливающего усилия, полученного в рамках лабораторных испытаний и с помощью полученной методики.

Выводы. Сравнение показало, что полученная методика имеет более высокие показатели соответствия с опытными данными, чем методики, представленные в ряде нормативных документов. Разработанная методика может применяться для оценки несущей способности плит перекрытия и фундаментных плит на продавливание с поперечной арматурой и без нее.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетон, плита, продавливание, масштабный эффект, регрессия, алгоритм Левенберга – Марквардта

Благодарности. Авторы выражают благодарность Никите Кирилловичу Гольякову и Сергею Сергеевичу Петрову за консультации по теме регрессионного анализа, а также анонимным рецензентам за конструктивные замечания и предложения.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бударин А.М., Ушаков О.Ю., Сабитов Л.С., Маилян Л.Р., Сосновских С.С. Методика расчета плит на продавливание, построенная с использованием регрессионного анализа // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 6. С. 867–887. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.867-887

Автор, ответственный за переписку: Александр Михайлович Бударин, alex.budarin01@gmail.com.

Regression-based method for calculation of the punching shear capacity of the slab

Alexander M. Budarin¹, Oleg Yu. Ushakov², Linar S. Sabitov³, Levon R. Mailyan⁴,
Sergey S. Sosnovskikh¹

¹ Institute Hydroproject; Moscow, Russian Federation;

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU);
Yekaterinburg, Russian Federation;

³ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

⁴ Don State Technical University (DSTU); Rostov-on-Don, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. At slab-column joints, where significant force is concentrated on a relatively small area of the support, punching shear failure of the slab may occur. This type of failure is accompanied by formation of the spatial failure surface called punching cone. The main factors influencing punching shear capacity are: energetic size effect, percentage of longitudinal reinforcement in the tensile zone of the slab, span to depth ratio, column perimeter to depth ratio. Lack of consideration for these factors in a calculation method may result in low accuracy. The purpose of this work is to develop a calculation method which takes into account the main factors affecting the punching shear capacity of the slab.

Materials and methods. The paper presents a comparison of the punching shear strength obtained in laboratory tests with domestic (CP 63.13330) and foreign (Eurocode 2, ACI 318-11, Model Code 2010) building codes. It is important to develop a more accurate method for calculation of punching shear strength of a slab. Coefficients of the method can be obtained by the least squares regression analysis using Levenberg – Marquardt algorithm based on the experimental data.

Results. As a result of the regression analysis, a calculation method for punching was obtained. The comparison of the punching shear strength obtained in laboratory tests with the described method is given.

Conclusions. The comparison showed that the obtained method has a higher compliance with the experimental data than the methods presented in a number of building codes. The developed method can be used to assess the punching shear strength of slabs and foundation with and without transverse reinforcement.

KEYWORDS: reinforced concrete, slab, punching shear, size effect, regression, Levenberg – Marquardt algorithm

Acknowledgements. The authors express their gratitude to Nikita Kirillovich Golyakov and Sergey Sergeevich Petrov for consultations on the topic of regression analysis, as well as to anonymous reviewers for constructive comments and suggestions.

FOR CITATION: Budarin A.M., Ushakov O.Yu., Sabitov L.S., Mailyan L.R., Sosnovskikh S.S. Regression-based method for calculation of the punching shear capacity of the slab. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(6):867-887. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.867-887 (rus.).

Corresponding author: Alexander M. Budarin, alex.budarin01@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

В местах сопряжения плитных и вертикальных железобетонных конструкций, где значительная сила сконцентрирована на относительно небольшой площади опоры, возможно разрушение плиты от продавливания. Данный тип разрушения сопровождается образованием пространственной поверхности разрушения, формируемой сетью трещин и называемой пирамидой продавливания. Величина предельного продавливающего усилия F_{ult} зависит от конфигурации плиты, ее армирования, а также геометрии опор.

В упрощенном виде для плит без поперечной арматуры значение F_{ult} принимается равным величине усилия, воспринимаемого бетоном F_b (1). Для плит с поперечной арматурой F_{ult} может быть найдено как минимальная величина среди условий (2)–(5), представляющих собой разные механизмы разрушения:

$$F_{ult} = \min(F_w, F_{out}, F_{cr}); \quad (1)$$

$$F_w = C_1 \cdot F_b + C_2 \cdot F_{sw}; \quad (2)$$

$$F_b = u \cdot h_0 \cdot R \cdot f_1 \cdot f_2 \dots f_n; \quad (3)$$

$$F_{out} = u_{out} \cdot h_0 \cdot R \cdot f_1 \cdot f_2 \dots f_n; \quad (4)$$

$$F_{cr} = C_3 F_b; \quad (5)$$

где C_1, C_2 — эмпирические коэффициенты, учитывающие изменение вклада бетона и поперечной арматуры в несущую способность плиты [1]; F_{sw} — усилие, воспринимаемое поперечной арматурой; u — периметр контура расчетного поперечного сечения, вос-

принимающего продавливающее усилие; h_0 — рабочая высота плиты; R — прочностной параметр, характеризующий сопротивление материала плиты; $f_1 \dots f_n$ — набор эмпирических функций; C_3 — эмпирический коэффициент, учитывающий тип поперечной арматуры и условия ее анкеровки [2].

Эмпирические функции $f_1 \dots f_n$ отражают влияние различных эффектов на величину вклада бетона F_b . В качестве основных можно выделить следующие эффекты.

1. Влияние процента продольного армирования растянутой зоны μ . Существенная часть несущей способности плиты обеспечивается за счет сил зацепления в изгибной трещине. Уменьшение процента продольного армирования μ ведет к увеличению ширины раскрытия трещин. С увеличением ширины раскрытия трещины уменьшается площадь контакта между крупным заполнителем и противоположным берегом трещины, что ведет к уменьшению вклада сил зацепления в несущую способность плиты. При этом, согласно исследованиям [3, 4], вклад продольной арматуры в несущую способность плиты при продавливании за счет нагельного эффекта пренебрежимо мал. В некоторых работах [5] данный параметр заменяется механическим коэффициентом продольного армирования ω , имеющим лучшую корреляцию с опытными данными:

$$\omega = \mu \cdot R_s / R_b, \quad (6)$$

где R_s — предел текучести продольной арматуры растянутой зоны; R_b — предел прочности бетона на одноосное сжатие.

2. Величина относительного пролета среза r_λ оказывает существенное влияние на механизм разрушения и несущую способность плиты:

$$r_\lambda = b/h_0, \quad (7)$$

где b — расстояние от грани колонны до точки приложения нагрузки; для плит, нагруженных равномерно распределенной нагрузкой, величина b принимается равной расстоянию от грани колонны до линии изменения знака радиального изгибающего момента в плите (для отдельно стоящих фундаментов b принимается равным расстоянию от грани колонны до края плиты, для плит перекрытий может быть принято $\approx 0,22L$, где L — величина пролета); h_0 — рабочая высота плиты.

Согласно исследованиям [6, 7] с уменьшением величины r_λ несущая способность плиты растет. Наиболее существенный рост наблюдается при значениях $r_\lambda < 4$, что объясняется образованием поля нормальных сжимающих напряжений между опорой и точкой приложения нагрузки, оказывающего влияние на напряженное состояние в области формирования пирамиды продавливания (нормальные сжимающие напряжения вызывают уменьшение величины гидростатического инварианта тензора напряжений, что ведет к увеличению прочности материала). В то же время увеличение значения r_λ сопровождается уменьшением несущей способности плиты, связанной с уменьшением изгибной жесткости конструкции (уменьшение изгибной жесткости конструкции ведет к увеличению ширины раскрытия трещин и уменьшению вклада сил зацепления [8]).

3. Одним из факторов, оказывающих влияние на несущую способность плит при продавливании, является масштабный энергетический эффект [9, 10]. Стабильный рост трещины происходит, когда величина высвобождаемой потенциальной энергии деформации U_E равна поверхностной энергии Γ , требуемой для образования новой поверхности трещины. Поверхностная энергия пропорциональна длине трещины l_{cr} , в то время как высвобождаемая энергия пропорциональна квадрату ее длины l_{cr}^2 (высвобождение энергии происходит из некоторой области во-

круг трещины). На рис. 1 представлены графики изменения энергий в процессе роста трещины.

После достижения определенной длины трещины (называемой критической) величина U_E превышает Γ вследствие более высокой скорости роста (квадратичная против линейной). В результате трещина производит больше энергии, чем потребляет, что выражается в ее лавинообразном росте, ведущем к хрупкому разрушению конструкции. С увеличением рабочей высоты плиты растет абсолютное значение критической длины трещины, а ее относительная величина (относительной рабочей высоты плиты) падает. Данное явление называется энергетическим масштабным эффектом. Подобная ситуация наблюдается и с зависимостью несущей способности плиты от ее рабочей высоты. Пример проявления этого эффекта представлен в труде [15], где приведено описание результатов испытаний плит PG-3 и PG-5. Образцы имели разную рабочую высоту ($h_0 = 456$ мм для PG-3 и $h_0 = 210$ мм для PG-5), в то время как остальные конструктивные параметры (процент продольного армирования, пролет среза, размер опоры относительно рабочей высоты) оставались идентичными. Процесс разрушения образца PG-5 имел пластичный характер и сопровождался значительными деформациями, интенсивным образованием изгибных трещин и достижением части продольной арматуры предела текучести. Для образца PG-3, имеющего большую рабочую высоту, напротив, наблюдался хрупкий механизм разрушения без достижения продольной арматурой предела текучести. В общем виде этот эффект может быть выражен с помощью формулы:

$$\sigma_n = B \cdot R_{bt} \cdot \left(1 + \frac{h_0}{d_0}\right)^{-1/2}, \quad (8)$$

где B — функция, учитывающая геометрию образца; R_{bt} — предел прочности бетона при одноосном растяжении; d_0 — переходный размер, представляющий собой эмпирическую величину, принимаемую постоянной для конструкций без поперечной арматуры.

Выражение (8) называется законом масштабного эффекта 3. Бажанта и представляет собой функцию, отражающую влияние масштабного эффекта на несущую способность конструкций без поперечной арматуры, в которых возможно стабильное развитие трещин [11]. С увеличением интенсивности поперечного армирования влияние масштабного эффекта на несущую способность плиты уменьшается.

4. Согласно исследованиям [8, 12] форма и размер опоры оказывают влияние на F_b . С ростом отношения периметра опоры u_0 , отнесенного к рабочей высоте плиты h_0 , наблюдается увеличение концентрации напряжений в углах опоры, что ведет к локальному образованию трещин, снижающих несущую способность плиты. На рис. 2 изображены изополя касательных напряжений ν в плитах одинаковой ра-

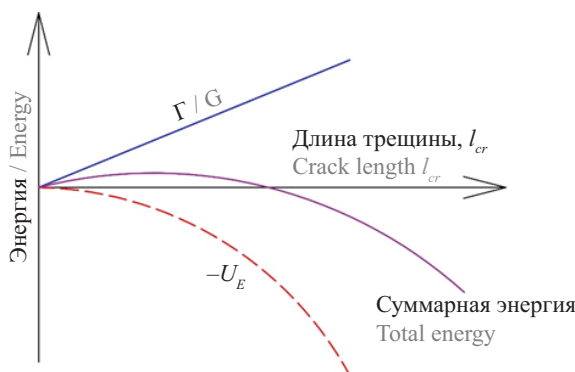


Рис. 1. Баланс энергии при росте трещины

Fig. 1. Energy balance during crack growth

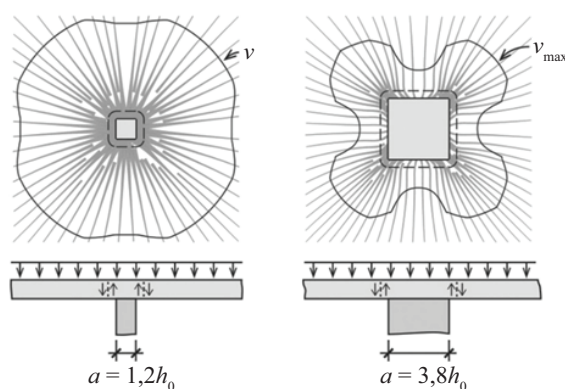


Рис. 2. Распределение касательных напряжений v в области вокруг опоры для колонн разного размера

Fig. 2. Distribution of the shear stresses v around support for different column sizes

бочей высоты, расположенных на расстоянии $h_0/2$ от грани опоры для колонн разного размера. Снижение несущей способности плиты также наблюдается при увеличении соотношения между максимальным и минимальным размером опоры c_{max}/c_{min} .

Этот эффект также объясняет снижение предельных касательных напряжений, воспринимаемых плитой при разрушении за контуром размещения поперечной арматуры [1].

В методиках расчета на продавливание, представленных в нормативных документах, отсутствует учет данных факторов, либо используемая функция некорректно отражает влияние фактора на несущую способность плиты при продавливании. Более точная зависимость может быть получена методом наименьших квадратов с помощью регрессионного анализа на основе результатов лабораторных испытаний. Регрессионный анализ позволяет для выбранного выражения (например, выражений (2)–(5)) найти значения независимых переменных (коэффициенты функций $f_1 \dots f_n$, эмпирические коэффициенты $C_1 \dots C_2$) таким образом, чтобы сумма квадратов разностей зависимой переменной (величина несущей способности плиты F_{calc} , полученная на основе выражений (1)–(5)) и наблюдаемой величин (величина несущей способности плиты F_{exp} , полученная в рамках лабораторных испытаний) была наименьшей.

Ранее подобный анализ применялся в публикациях [5, 10, 13, 14]. Однако исследования [5, 13, 14] были сконцентрированы на плитах без поперечной арматуры, в работе [10] не учитывалась возможность разрушения плит с поперечной арматурой по грани колонны и за контуром размещения поперечной арматуры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

За многолетний период изучения механизма разрушения плит от продавливания создано множество методик, позволяющих оценить несущую способность плиты в рамках этого типа разруше-

ния. Методики, созданные различными авторами, существенно отличаются друг от друга: учитывают разные параметры, коэффициенты и могут давать разные результаты. Оценка точности результатов, полученных с помощью методики, может быть установлена путем сравнения их с результатами лабораторных испытаний. Ниже приведено сравнение величин предельных продавливающих усилий, полученных в результате лабораторных испытаний F_{exp} , с величинами, вычисленными с помощью методик, представленных в следующих нормативных документах: Eurocode 2¹, СП 63.13330², ACI 318-11³, Model Code 2010⁴ F_{calc} . Для выполнения данной задачи собраны результаты испытаний 544 плит, включающих образцы, моделирующие работу плит перекрытия и фундаментных плит, разрушение которых произошло от продавливания [12–57]. Сравнение выполнялось без учета коэффициентов надежности. В табл. 1 приведены максимальные и минимальные значения параметров испытанных плит.

Для плит с поперечной арматурой учитывалось распределение поперечной арматуры (рис. 3) и ее тип (рис. 4).

Геометрическое представление параметров, используемых в нормативных документах для вычисления несущей способности плиты на продавливание, показано на рис. 5.

Табл. 1. Минимальные и максимальные значения параметров испытанных плит

Table 1. Minimum and maximum parameter values of tested slabs

Все плиты / All slabs		
Параметр Parameter	Минимум Minimum	Максимум Maximum
h_0 , мм / mm	41	670
a_1 , мм / mm	54	520
a_2 , мм / mm	25	901
r_λ	0,60	13,55
B	12	150
d_g , мм / mm	4	38
μ , %	0,2	3,7
μ' , %	0	1,8
R_s , МПа / MPa	255	720

¹ EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings.

² СП 63.13330.2018. СНиП 52-01–2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М.: Минстрой России, 2018.

³ ACI 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11). American Concrete Institute, ACI Committee 318. Detroit, USA, 2011. 503 p.

⁴ MC, Model Code 2010 (Final Draft), Fédération internationale du béton fib. Lausanne, Switzerland, 2011.

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Плиты с поперечным армированием Slabs with shear reinforcement		
Параметр Parameter	Минимум Minimum	Максимум Maximum
R_{sw} , МПа / МПа	238	917
n_r	2	10
s_0 , мм / мм	20	200
s_1 , мм / мм	40	500
\varnothing_{sw} , мм mm	5	25

Примечание: h_0 — рабочая высота плиты; a_1 — размер стороны квадратной колонны; a_2 — диаметр круглой колонны; r_λ — величина относительного пролета среза (расстояние от грани опоры до точки приложения нагрузки, деленное на рабочую высоту); B — класс бетона; d_g — максимальный диаметр крупного заполнителя; μ — процент армирования растянутой зоны; μ' — процент армирования сжатой зоны; R_s — предел текучести продольной арматуры; R_{sw} — предел текучести поперечной арматуры; n_r — количество рядов поперечного армирования; s_0 — расстояние от грани колонны до центра тяжести стержня первого периметра поперечной арматуры; s_1 — шаг поперечной арматуры; \varnothing_{sw} — диаметр поперечной арматуры.

Note: h_0 — effective depth of the slab; a_1 — side dimension of a square column; a_2 — diameter of a round column; r_λ — value of relative shear span (distance from the support face to the point of load application divided by the effective depth); B — concrete grade; d_g — maximum diameter of coarse aggregate; μ — percentage of tensile zone reinforcement; μ' — percentage of compressed zone reinforcement; R_s — yield strength of longitudinal reinforcement; R_{sw} — yield strength of transverse reinforcement; n_r — number of rows of transverse reinforcement; s_0 — distance from the column face to the centre of gravity of the first perimeter transverse reinforcement bar; s_1 — transverse reinforcement spacing; \varnothing_{sw} — diameter of transverse reinforcement.

Результаты сравнения характеризуются с помощью следующих величин:

1. Коэффициент детерминации R^2 является показателем соответствия математической моде-

ли данным лабораторных испытаний. Величина R^2 принимает значения от 0 до 1: чем ближе значение R^2 к 1, тем выше степень соответствия:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (F_{exp,i} - F_{calc,i})^2}{\sum_{i=1}^n (F_{exp,i} - \overline{F_{exp}})^2}, \quad (9)$$

где $\overline{F_{exp}}$ — средняя величина среди опытных результатов.

В рамках работы используется следующая условная шкала оценки значения коэффициента детерминации:

- $R^2 \geq 0,9$ — высокая степень соответствия опытным данным;
- $0,8 \leq R^2 < 0,9$ — хорошая степень соответствия опытным данным;
- $0,7 \leq R^2 < 0,8$ — удовлетворительная степень соответствия опытным данным;
- $R^2 < 0,7$ — низкая степень соответствия опытным данным.

2. Коэффициент вариации (Coefficient of Variation — CV) является показателем стабильности вычислений и характеризует относительную меру отклонения измеренных значений от среднего арифметического. Чем ближе величина CV к нулю, тем стабильнее результаты.

3. Максимальная и минимальные величины F_{calc}/F_{exp} характеризуют наибольшее отклонение в сторону завышения и занижения результатов.

Согласно СП 63.13330 предельная несущая способность плиты на продавливание без поперечной арматуры может быть вычислена с помощью формулы (10). Несущая способность для плит с поперечной арматурой рассчитывается как минимальная величина среди выражений (11–13):

$$F_b = u_{СП63} \cdot h_0 \cdot R_{bt}; \quad (10)$$

$$F_w = F_b + F_{sw} = u_{СП63} \cdot h_0 \cdot R_{bt} + 0,8 \cdot \frac{A_{sw,СП63} \cdot R_{sw}}{s_w} \cdot u_{СП63}, F_{sw} \geq 0,25 \cdot F_b; \quad (11)$$

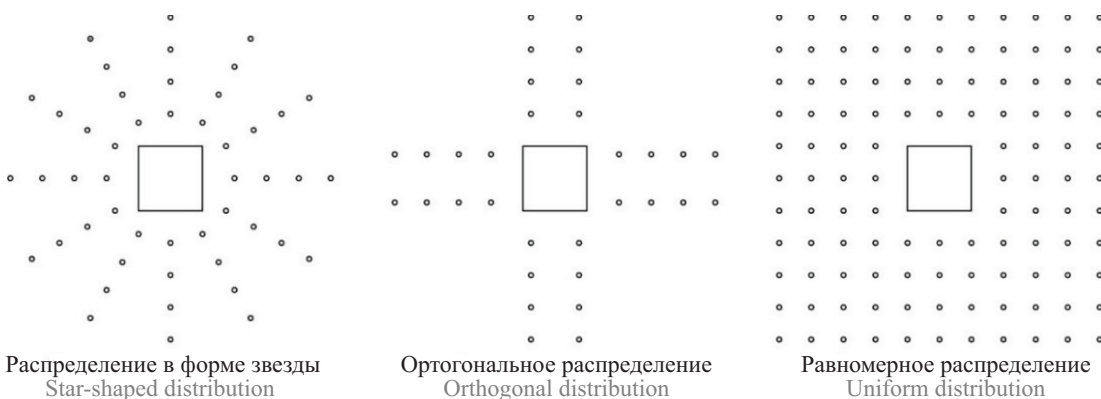


Рис. 3. Виды распределения поперечной арматуры вокруг опоры

Fig. 3. Transverse reinforcement distribution around the support

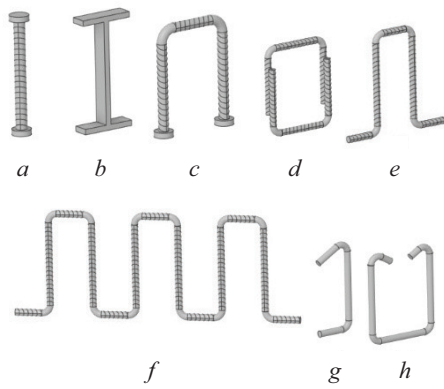


Рис. 4. Типы поперечной арматуры: *a* — поперечная арматура с высаженной головкой; *b* — поперечная арматура, сформированная из обрезков металлоконструкций; *c* — хомуты с высаженными головками; *d–h* — хомуты различной конфигурации

Fig. 4. Types of transverse reinforcement: *a* — transverse reinforcement with double headed studs; *b* — transverse reinforcement formed from metal structure scraps; *c* — stirrups with double headed studs; *d–h* — stirrups of various configurations

$$F_{out} = u_{СП63.out} \cdot h_0 \cdot R_{bt}; \quad (12)$$

$$F_{cr} = 2 \cdot F_b, \quad (13)$$

где F_b — предельное усилие, воспринимаемое бетоном; $u_{СП63}$ — длина контрольного периметра, расположенного на расстоянии $0,5h_0$ от опоры;

R_{bt} — прочность бетона на одноосное растяжение; 0,8 — скалярный множитель, учитывающий неравномерное распределение напряжений в поперечной арматуре; $A_{sw,СП63}$ — площадь поперечной арматуры, расположенной в расчетном сечении; $u_{СП63.out}$ — длина расчетного периметра, расположенного на расстоянии $h_0/2$ от границы размещения поперечной арматуры.

На рис. 6 приведено сравнение величин предельного продавливающего усилия, полученного в рамках лабораторных испытаний F_{exp} и с помощью СП 63.13330 F_{calc} . В табл. 2 представлены показатели оценки сравнения величин F_{exp} и F_{calc} .

Результаты, полученные с помощью СП 63.13330 для плит без поперечной арматуры, имеют хорошую степень соответствия опытным данным для плит с $r_\lambda \leq 4$ и $\mu < 1\%$, а также для плит с $r_\lambda > 4$ и $\mu \geq 1\%$. Для плит с $r_\lambda \leq 4$ и $\mu \geq 1\%$ наблюдается удовлетворительное соответствие опытным данным, для плит с $r_\lambda > 4$ и $\mu < 1\%$ — низкая степень соответствия, что связано с отсутствием учета влияния процента продольного армирования и учета масштабного энергетического эффекта [10, 57]. Для $r_\lambda \leq 4$ влияние масштабного эффекта компенсируется за счет отсутствия учета величины относительного пролета среза, увеличивающей несущую способность плиты. Для плит с поперечной арматурой наблюдается хорошая степень соответствия опытным данным.

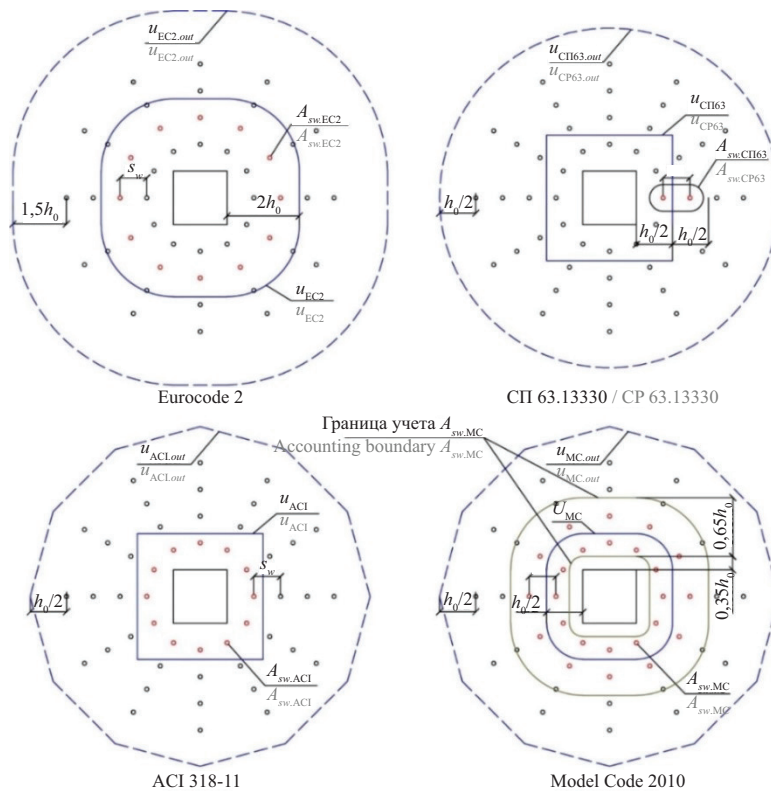


Рис. 5. Геометрическое представление параметров, используемых в нормативных документах для вычисления несущей способности плиты на продавливание

Fig. 5. Geometric representation of the parameters used in building codes to calculate punching shear capacity of the slab

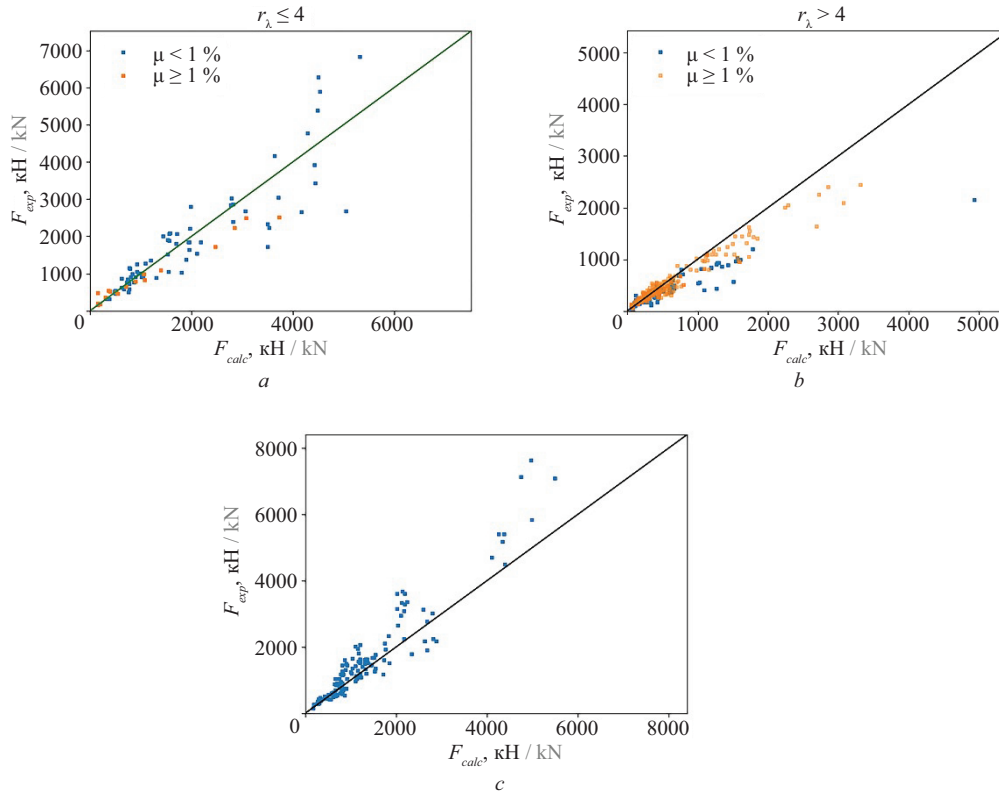


Рис. 6. Сравнение величин предельного продавливающего усилия, полученного в рамках лабораторных испытаний F_{exp} и с помощью СП 63.13330 F_{calc} : *a* — плиты без поперечной арматуры с величиной $r_\lambda \leq 4$; *b* — плиты без поперечной арматуры с величиной $r_\lambda > 4$; *c* — плиты с поперечной арматурой

Fig. 6. Comparison of the punching shear capacity obtained in laboratory tests F_{exp} and CP 63.13330 F_{calc} : *a* — slabs without shear reinforcement with $r_\lambda \leq 4$; *b* — slabs without shear reinforcement with $r_\lambda > 4$; *c* — slabs with shear reinforcement

Предельное продавливающее усилие для плит без поперечной арматуры согласно Eurocode 2 может быть вычислено на основании формул (14) и (15). Предельное продавливающее усилие для плит с поперечной арматурой можно рассчитать как минимальную величину среди выражений (16), (18) и (19). Эффективные напряжения в поперечной арматуре $f_{yw,sw}$ вычисляются на основании выражения (17):

$$F_b = 0,18 \cdot k \cdot \mu^{1/3} \cdot u_{EC2} \cdot h_0 \cdot f_c^{1/3} \geq v_{min} \cdot u_{EC2} \cdot h = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_c^{1/2} \cdot u_{EC2} \cdot h; \quad (14)$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{h_0 [\text{MM}]} \leq 2; \quad (15)$$

$$F_w = 0,75 \cdot F_b + F_{sw} = 0,75 \cdot F_b + 1,5 \cdot A_{sw,EC2} \cdot f_{sw,ef} \cdot \frac{1}{s_w \cdot u_{EC2}}, F_{sw} \leq 1,5 \cdot F_b; \quad (16)$$

$$f_{yw,ef} = 250 + 0,25 \cdot h_0 [\text{MM}] \leq R_{sw} [\text{МПа}]; \quad (17)$$

$$F_{out} = 0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \mu)^{1/3} \cdot u_{EC2,out} \cdot h_0 \cdot f_c^{1/3}; \quad (18)$$

Табл. 2. Показатели оценки результатов сравнения F_{exp} и F_{calc} , вычисленной с помощью СП 63.13330

Table 2. Evaluation indicators of F_{exp} and F_{calc} comparison results calculated with CP 63.13330

Показатель Indicator	Плиты без поперечной арматуры Slabs without shear reinforcement				Плиты с поперечной арматурой Slabs with shear reinforcement
	$r_\lambda \leq 4$		$r_\lambda > 4$		
	$\mu < 1\%$	$\mu \geq 1\%$	$\mu < 1\%$	$\mu \geq 1\%$	
<i>CV</i>	0,24	0,51	0,37	0,26	0,37
<i>R</i> ²	0,80	0,70	-0,21	0,81	0,81
Минимум F_{exp}/F_{calc} Minimum	0,49	0,68	0,34	0,48	0,62
Максимум F_{exp}/F_{calc} Maximum	1,51	3,19	2,50	2,21	1,86

$$F_{cr} = 0,24 \cdot \left(1 - \frac{f_c [\text{МПа}]}{250}\right) \cdot f_c \cdot u_{\text{EC2},0} \cdot h_0, \quad (19)$$

где k — функция, учитывающая влияние энергетического масштабного эффекта; μ — процент продольного армирования растянутой зоны (принимаемый не более 2 %); u_{EC2} — контрольный периметр, расположенный на расстоянии $2h_0$ от грани опоры; f_c — цилиндрическая прочность бетона на одноосное сжатие; v_{min} — минимальная величина номинальных касательных напряжений, воспринимаемых расчетным кон-

туром, позволяющая установить нижнюю границу величины F_b для случаев с низкими процентами продольного армирования; $A_{\text{sw,EC2}}$ — площадь поперечной арматуры одного периметра армирования вокруг колонны; $f_{\text{sw,ef}}$ — эффективные напряжения в арматуре; R_{sw} — предел текучести арматуры; s_w — шаг поперечной арматуры; $u_{\text{EC2},0}$ — периметр опоры.

На рис. 7 приведено сравнение величин предельного продавливающего усилия, полученного в рамках лабораторных испытаний F_{exp} и с помощью Eurocode 2 F_{calc} . В табл. 3 представлены показатели оценки сравнения величин F_{exp} и F_{calc} .

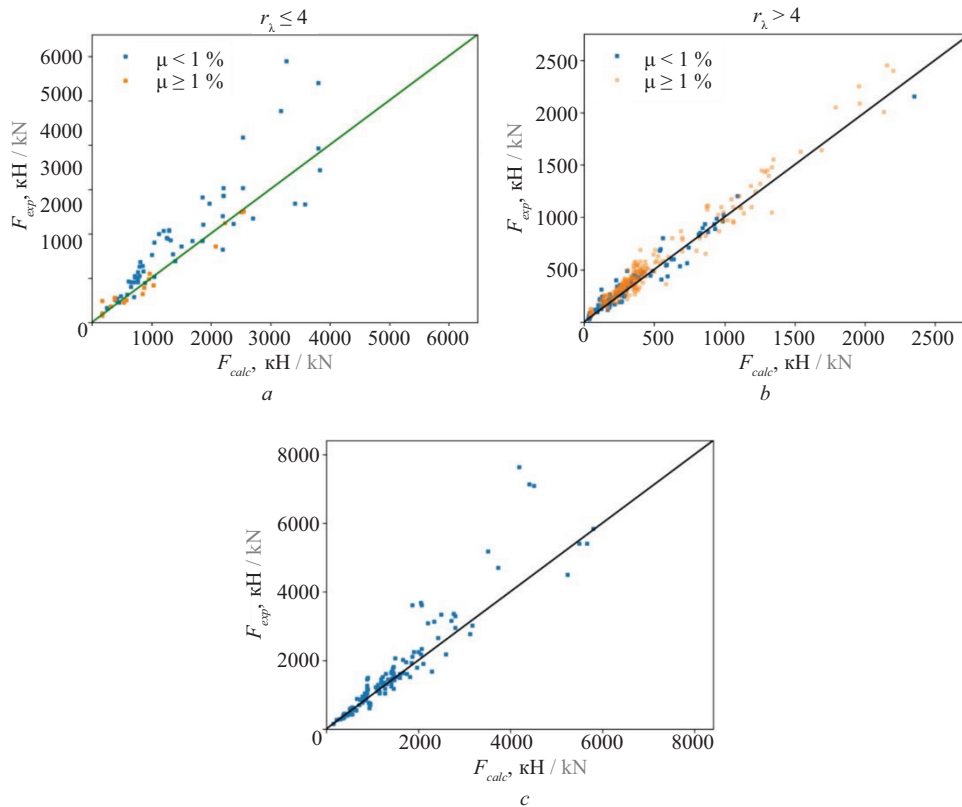


Рис. 7. Сравнение величин предельного продавливающего усилия, полученного в рамках лабораторных испытаний F_{exp} и с помощью Eurocode 2 F_{calc} : а — плиты без поперечной арматуры с величиной $r_\lambda \leq 4$; б — плиты без поперечной арматуры с величиной $r_\lambda > 4$; в — плиты с поперечной арматурой

Fig. 7. Comparison of the punching shear capacity obtained in laboratory tests F_{exp} and Eurocode 2 F_{calc} : а — slabs without shear reinforcement with $r_\lambda \leq 4$; б — slabs without shear reinforcement with $r_\lambda > 4$; в — slabs with shear reinforcement

Табл. 3. Показатели оценки результатов сравнения F_{exp} и F_{calc} , вычисленной с помощью Eurocode 2

Table 3. Evaluation indicators of F_{exp} and F_{calc} comparison results calculated with Eurocode 2

Показатель Indicator	Плиты без поперечной арматуры Slabs without shear reinforcement				Плиты с поперечной арматурой Slabs with shear reinforcement
	$r_\lambda \leq 4$		$r_\lambda > 4$		
	$\mu < 1\%$	$\mu \geq 1\%$	$\mu < 1\%$	$\mu \geq 1\%$	
CV	0,22	0,42	0,27	0,23	0,20
R^2	0,65	0,95	0,95	0,95	0,83
Минимум $F_{\text{exp}}/F_{\text{calc}}$ Minimum	0,74	0,75	0,70	0,63	0,65
Максимум $F_{\text{exp}}/F_{\text{calc}}$ Maximum	1,95	2,91	2,58	2,70	1,94

Результаты, полученные с помощью Eurocode 2 для плит без поперечной арматуры, показывают высокую степень соответствия опытных данных кроме плит с $r_\lambda \leq 4$ и $\mu < 1\%$, где наблюдается низкая степень. Согласно исследованию [10] функция k некорректно отражает зависимость влияния масштабного эффекта на вклад бетона F_b , что может приводить к завышению реальной несущей способности для плит с большой рабочей высотой. Для плит с поперечной арматурой наблюдается хорошее соответствие опытным данным.

Согласно ACI 318-11 предельное продавливающее усилие для плит без поперечной арматуры может быть вычислено с помощью формулы (20). Предельное продавливающее усилие для плит с поперечной арматурой вычисляется как минимальная величина среди выражений (21)–(23), представляющих различные механизмы разрушения плиты:

$$F_b = \frac{1}{3} \cdot u_{ACI} \cdot h_0 \cdot \sqrt{f_c}; \quad (20)$$

$$F_w = C_1 \cdot u_{ACI} \cdot h_0 \cdot \sqrt{f_c} + A_{sw,ACI} \cdot R_{sw} \cdot \frac{h_0}{s_w}; \quad (21)$$

$$F_{out} = \frac{1}{6} \cdot u_{ACI,out} \cdot h_0 \cdot \sqrt{f_c}; \quad (22)$$

$$F_{cr} = C_2 \cdot u_{ACI} \cdot h_0 \cdot \sqrt{f_c}; \quad (23)$$

где C_1 — эмпирическая константа, зависящая от типа поперечного армирования и принимаемая равной 1/6 для типов a – c и 1/4 для типов d – h согласно рис. 5; $A_{sw,ACI}$ — площадь поперечной арматуры одного периметра армирования вокруг колонны; R_{sw} — предел текучести арматуры; s_w — шаг поперечной арматуры; $u_{ACI,out}$ — длина расчетного периметра, расположенного на расстоянии $h_0/2$ от границы размещения поперечной арматуры; C_2 — эмпирическая константа, зависящая от типа поперечного армирования и принимаемая равной 1/2 для типов a – c и 2/3 для типов d – h согласно рис. 5.

На рис. 8 приведено сравнение величин предельного продавливающего усилия, полученного в рамках лабораторных испытаний F_{exp} и с помощью ACI 318-11 F_{calc} . В табл. 4 представлены показатели оценки сравнения величин F_{exp} и F_{calc} .

Результаты, полученные с помощью ACI 318-11 для плит без поперечной арматуры, имеют низкую степень соответствия опытным данным для плит

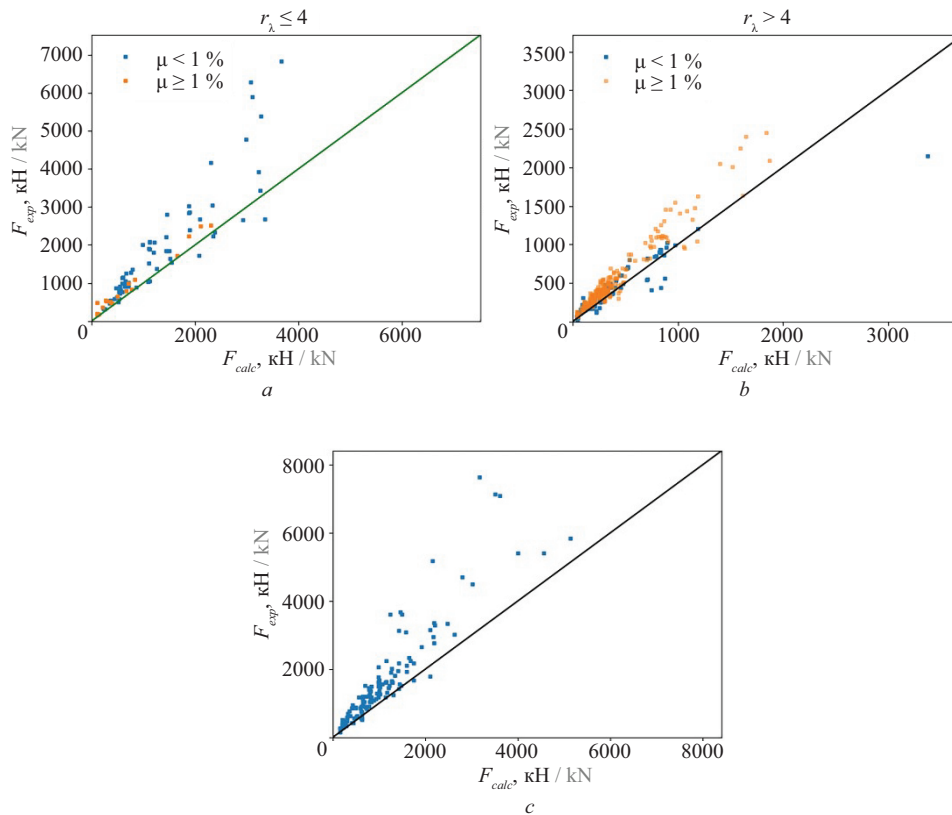


Рис. 8. Сравнение величин предельного продавливающего усилия, полученного в рамках лабораторных испытаний F_{exp} и с помощью ACI 318-11 F_{calc} : a — плиты без поперечной арматуры с величиной $r_\lambda \leq 4$; b — плиты без поперечной арматуры с величиной $r_\lambda > 4$; c — плиты с поперечной арматурой

Fig. 8. Comparison of the punching shear capacity obtained in laboratory tests F_{exp} and ACI 318-11 F_{calc} : a — slabs without shear reinforcement with $r_\lambda \leq 4$; b — slabs without shear reinforcement with $r_\lambda > 4$; c — slabs with shear reinforcement

Табл. 4. Показатели оценки результатов сравнения F_{exp} и F_{calc} , вычисленной с помощью АСІ 318-11

Table 4. Evaluation indicators of F_{exp} and F_{calc} results comparison calculated with АСІ 318-11

Показатель Indicator	Плиты без поперечной арматуры Slabs without shear reinforcement				Плиты с поперечной арматурой Slabs with shear reinforcement
	$r_\lambda \leq 4$		$r_\lambda > 4$		
	$\mu < 1\%$	$\mu \geq 1\%$	$\mu < 1\%$	$\mu \geq 1\%$	
CV	0,22	0,53	0,30	0,23	0,27
R^2	0,60	0,92	0,76	0,81	0,58
Минимум F_{exp}/F_{calc} Minimum	0,80	1,04	0,51	0,70	0,84
Максимум F_{exp}/F_{calc} Maximum	2,03	4,81	3,22	3,15	2,93

с $r_\lambda \leq 4$ и $\mu < 1\%$ и удовлетворительную степень для плит с $r_\lambda > 4$ и $\mu < 1\%$, что связано с отсутствием учета процента продольного армирования. Для плит с $\mu \geq 1\%$ и $r_\lambda \leq 4$ наблюдается высокая степень соответствия опытным данным, для плит с $\mu \geq 1\%$ и $r_\lambda > 4$ — хорошая степень соответствия. В формуле (20) отсутствует учет масштабного энергетического эффекта, что может приводить к завышению реальной несущей способности плит с рабочей высотой более 400 мм и $r_\lambda > 4$ [10]. Также в формуле (20) отсутствует учет масштабного энергетического эффекта, что может приводить к занижению реальной несущей способности плит с величинами $r_\lambda \leq 4$. Для плит с поперечной арматурой отмечается низкое соответствие опытным данным с тенденцией к занижению реальной несущей способности плит. Наличие этой тенденции можно объяснить некорректными (слишком низкими) величинами коэффициентов C_1, C_2 , а также эмпирического коэффициента $1/6$, вводимого к усилию, воспринимаемого бетоном за гранью установки поперечной арматуры. Например, использование коэффициента $1/4$ вместо $1/6$ позволяет получить $R^2 = 0,74$ вместо $R^2 = 0,58$.

Согласно Model Code 2010 предельное продавливающее усилие для плит без поперечной арматуры может быть вычислено на основании формул (24)–(27). Документ предполагает четыре уровня уточнения результатов, влияющих на содержание формулы (26):

- 1) уровень I используется для предварительных расчетов, позволяющих назначить размеры конструкции;
- 2) уровень II рекомендуется для проектирования новых конструкций;
- 3) применение уровня III рекомендуется для проверки несущей способности существующих конструкций;
- 4) уровень IV используется для более детального изучения существующих конструкций и нестандартных проектных решений.

Применение формул более высоких уровней дает возможность получить более точный результат, но сопряжено с существенным усложнением расчета (уровень IV требует использования результатов

физически нелинейного расчета). В рамках данной работы используются формулы уровня II:

$$F_b = k_\psi \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_{MC} \cdot h_0; \quad (24)$$

$$k_\psi = \frac{1}{1,5 + 0,9 \cdot \psi \cdot h_0 \cdot k_{dg}} \leq 0,6; \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \psi &= 1,5 \cdot \frac{r}{h_0} \cdot \frac{R_s}{E_s} \cdot \left(\frac{m_s}{m_R} \right)^{3/2} = \\ &= 1,5 \cdot \frac{r}{h_0} \cdot \frac{R_s}{E_s} \cdot \left(\frac{F}{8 \cdot m_R} \right)^{3/2}; \end{aligned} \quad (26)$$

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g [\text{мм}]} \geq 0,75, \quad (27)$$

где k_ψ — функция, учитывающая снижение несущей способности плиты из-за раскрытия изгибных трещин; ψ — угол поворота плиты в результате раскрытия изгибных трещин возле опоры; k_{dg} — функция, учитывающая шероховатость трещины; r — расстояние от центра опоры до линии изменения знака радиального изгибающего момента (может быть принят равным $\approx 0,22$ пролета плиты); R_s, E_s — предел текучести и модуль упругости продольной арматуры соответственно; m_s — изгибающий момент, действующий в плите (может быть принят равным $F/8$, где F — продавливающее усилие); m_R — предельный изгибающий момент, при котором происходит разрушение плиты от изгиба; d_g — максимальный диаметр крупного заполнителя.

Поскольку изгибающий момент m_s , требуемый для вычисления угла поворота ψ , связан с величиной продавливающего усилия F , предельное продавливающее усилие F_b может быть найдено путем совместного решения уравнений (24) и (26) с подстановкой F_b вместо F . Графическое представление решения изображено на рис. 9.

Предельное продавливающее усилие для плит с поперечной арматурой может быть вычислено с помощью стратегии решения, используемой для получения величины F_b как минимальная величина среди выражений (28), (30) и (31). Напряжения

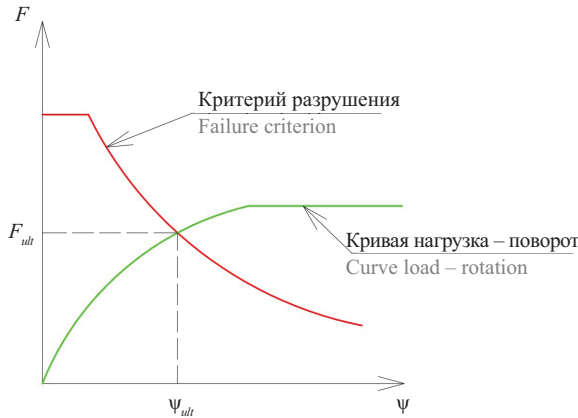


Рис. 9. Графическая интерпретация решения согласно Model Code 2010

Fig. 9. Graphical interpretation of the solution according to Model Code 2010

в поперечной арматуре $f_{yw,sw}$ вычисляются на основании выражения (29):

$$F_w = F_b + F_{sw} = k_\psi \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_{MC} \cdot h_0 + \sum A_{sw,MC} \cdot \sigma_{sw}, \sum A_{sw,MC} \cdot R_{sw} \geq 0,5 \cdot F_b; \quad (28)$$

$$\sigma_{sw} = \frac{E_{sw} \cdot \psi}{6} \cdot \left(1 + \frac{f_{bd}}{R_{sw}} \cdot \frac{h_0}{\phi} \right) \leq R_{sw}; \quad (29)$$

$$F_{out} = k_\psi \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_{MC,out} \cdot h_0; \quad (30)$$

$$F_{cr} = k_{sys} \cdot k_\psi \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_{MC} \cdot h_0, \quad (31)$$

где $A_{sw,MC}$ — площадь всей поперечной арматуры, расположенной в границах $0,35h_0 \dots h_0$ вокруг опоры; E_{sw} — модуль упругости поперечной арматуры; f_{bd} — прочность связи бетона и арматуры (для арматуры периодического профиля может быть принята равной 3 МПа); ϕ — диаметр поперечной арматуры; $u_{MC,out}$ — длина расчетного периметра, расположенного на расстоянии $h_0/2$ от границы размещения поперечной арматуры; k_{sys} — эмпирический коэффициент, принимаемый на основе опытных данных в зависимости от типа поперечной арматуры (согласно работе [1] величину коэффициента можно принять равной 2,4 для типов поперечной арматуры a - c и 2,8 для типов d - h согласно рис. 4).

На рис. 10 представлено сравнение величин предельного продавливающего усилия, полученного в рамках лабораторных испытаний F_{exp} и с помощью

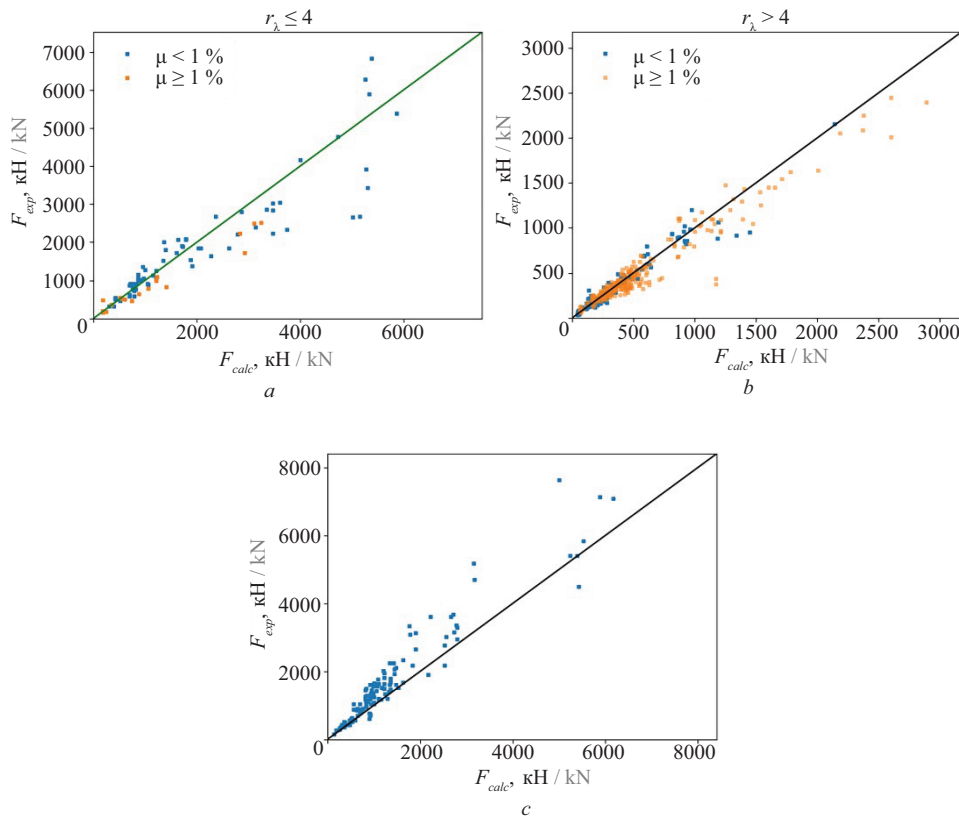


Рис. 10. Сравнение величин предельного продавливающего усилия, полученного в рамках лабораторных испытаний F_{exp} и с помощью Model Code 2010 F_{calc} : a — плиты без поперечной арматуры с величиной $r_\lambda \leq 4$; b — плиты без поперечной арматуры с величиной $r_\lambda > 4$; c — плиты с поперечной арматурой

Fig. 10. Comparison of the punching shear capacity obtained in laboratory tests F_{exp} and Model Code 2010 F_{calc} : a — slabs without shear reinforcement with $r_\lambda \leq 4$; b — slabs without shear reinforcement with $r_\lambda > 4$; c — slabs with shear reinforcement

Табл. 5. Показатели оценки результатов сравнения F_{exp} и F_{calc} , вычисленной с помощью Model Code 2010

Table 5. Evaluation indicators of F_{exp} and F_{calc} results comparison calculated with Model Code 2010

Показатель Indicator	Плиты без поперечной арматуры Slabs without shear reinforcement				Плиты с поперечной арматурой Slabs with shear reinforcement
	$r_\lambda \leq 4$		$r_\lambda > 4$		
	$\mu < 1\%$	$\mu \geq 1\%$	$\mu < 1\%$	$\mu \geq 1\%$	
CV	0,22	0,49	0,22	0,20	0,19
R^2	0,79	0,67	0,96	0,94	0,85
Минимум F_{exp}/F_{calc} Minimum	0,52	0,59	0,60	0,58	0,67
Максимум F_{exp}/F_{calc} Maximum	1,48	2,67	2,27	1,91	1,91

Model Code 2010 F_{calc} . В табл. 5 приведены показатели оценки сравнения величин F_{exp} и F_{calc} .

Для плит без поперечной арматуры с $r_\lambda \leq 4$ и $\mu \geq 1\%$ наблюдается низкое соответствие опытными данным, для плит с $r_\lambda \leq 4$ и $\mu < 1\%$ — удовлетворительная степень соответствия опытными данным. Для плит с $r_\lambda > 4$ отмечается высокая степень соответствия опытными данным. Масштабный энергетический эффект в функции (24) учитывается с помощью использования в функции k_ψ произведения $k_{dg} \cdot h_0$ в знаменателе. Согласно работе [10] подобный подход к учету масштабного эффекта некорректен и приводит к занижению реальной несущей способности плит с большой рабочей высотой. Для плит с поперечной арматурой наблюдается хорошее соответствие опытными данным с тенденцией к занижению реальной несущей способности плит.

Таким образом, актуальной является задача разработки методики расчета на продавливание, отражающей основные эффекты, оказывающие влияние на несущую способность плиты. Методика может быть изложена в виде набора функций, представляющих собой разные механизмы разрушения плиты. Используя в качестве основы выражения (1)–(5), общий вид функций может быть показан в виде выражений (32)–(35):

$$F_b = x_1 \cdot R_{bt} \cdot u_{СП63} \cdot h_0 \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{h_0}{x_2}}} \cdot \left(\frac{\mu \cdot R_s}{R_b}\right)^{x_3} \cdot r_\lambda^{x_4} \cdot \left(\frac{a}{h_0}\right)^{x_5}; \quad (32)$$

$$F_w = x_6 \cdot F_b + x_7 \cdot A_{sw} \cdot R_{sw} \cdot \left(\frac{a}{h_0}\right)^{x_5}; \quad (33)$$

$$F_{out} = x_8 \cdot R_{bt} \cdot u_{СП63,out} \cdot h_0 \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{h_0}{x_2}}} \cdot \left(\frac{\mu \cdot R_s}{R_b}\right)^{x_3} \cdot r_\lambda^{x_4} \cdot \left(\frac{a_{out}}{h_0}\right)^{x_5}; \quad (34)$$

$$F_{cr} = x_9 \cdot F_b, \quad (35)$$

где $x_1 \dots x_9$ — коэффициенты функций; a — параметр, принимаемый равным $2 \cdot \pi \cdot d$ для круглых опор (d — диаметр опоры) и $4 \cdot a_{max} \leq 16 \cdot a_{min}$ для остальных видов опор (a_{max} и a_{min} — размеры наиболее длинной и короткой сторон опоры в плане соответственно); A_{sw} — площадь всей поперечной арматуры, расположенной в границах $1/3h_0 \dots h_0$ вокруг опоры; a_{out} — параметр, принимаемый аналогично параметру a , но для контура установки поперечной арматуры с учетом его сторон и формы. Вид функции, описывающей влияние масштабного энергетического эффекта, был выбран на основе работ [10, 11].

Задача сводится к поиску величин коэффициентов функций. Искомые коэффициенты могут быть найдены с помощью взвешенной регрессии нескольких переменных с помощью итерационного алгоритма Левенберга – Марквардта [58–60]. Алгоритм Левенберга – Марквардта позволяет найти коэффициенты функции, дающие наименьшую сумму квадратов разностей наблюдаемой F_{exp} и предсказанной F_{calc} величин $F(x)$:

$$F(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m f_i^2(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (F_{calc,i}(x) - F_{exp,i})^2 \rightarrow \min. \quad (36)$$

В рамках взвешенной регрессии при сохранении формы регрессионного уравнения вводится неравноценное отношение к ошибкам уравнения. Для этого точкам данных присваиваются веса в зависимости от их дисперсии. Взвешенная регрессия

```

1      begin
2      initialize initial values:  $x = x_0, \lambda = \max\{a_{ij}\} \cdot 10^{-3}, v = 2, k = 0, F(x), L(x)$ 
3      calculate:  $f(x), J(x), A=J(x)^T \cdot J(x), g(x)=J(x)^T \cdot f(x), found = (\|g(x)\|_{\infty} \leq \varepsilon_1)$ 
4      while (not found), and ( $k < k_{max}$ )
5           $k = k + 1, solve (A+\lambda \cdot I) \cdot h_{lm} = -g(x) \rightarrow h_{lm}$ 
6          if  $\|h_{lm}\| \leq \varepsilon_2 \cdot (\|x\| + \varepsilon_2)$ :
7              found = true
8          else:
9               $x_{new} = x + h_{lm}$ 
10              $l(x_{new}) = f(x) + J(x) \cdot h_{lm}$ 
11              $L(x_{new}) = 0.5 \cdot l(x_{new}) \cdot l(x_{new})$ 
12              $\rho = (F(x) - F(x_{new})) / (L(0) - L(x_{new}))$ 
13             if  $\rho > 0$ :
14                  $x = x_{new}$ 
15                  $A = J(x)^T \cdot J(x), g(x) = J(x)^T \cdot f(x)$ 
16                 found =  $(\|g(x)\|_{\infty} \leq \varepsilon_1)$ 
17                  $\lambda = 1/3 \cdot \lambda, v = 2$ 
18             else:
19                  $\lambda = \lambda \cdot v, v = v \cdot 2$ 
20      end
    
```

Рис. 11. Алгоритм Левенберга — Марквардта, представленный в виде псевдокода

Fig. 11. Levenberg – Marquardt algorithm represented as a pseudocode

дает возможность снизить влияние ошибки с большей дисперсией на результат. Алгоритм Левенберга — Марквардта в виде псевдокода представлен на рис. 11, где x, x_0 — текущие и начальные значения искомых параметров $x_1, x_2 \dots x_n$; $f(x)$ — минимизируемая величина ошибки $F_{calc}(x) - F_{exp}$; $J(x)$ — матрица Якоби вектора-функции $f(x)$; λ — параметр регуляризации; v — коэффициент линейности шага; h_{lm} — величина изменения параметров x ; ε — критерии сходимости алгоритма; a_{ij} — элементы матрицы A . Множитель $1/3$ (строка 17 рис. 11) к параметру λ выбирался на основании данных работы [10]. Алгоритм считается сошедшимся при удовлетворении условия $\|g(x)\|_{\infty} \leq \varepsilon_1$ (строка 16 рис. 11) или условия $\|h_{lm}\| \leq \varepsilon_2 \cdot (\|x\| + \varepsilon_2)$ (строка 6 рис. 11).

Регрессионный анализ выполняется в два этапа: на первом этапе, используя результаты испытаний плит без поперечной арматуры, осуществляется поиск коэффициентов $x_1 \dots x_5$ для функции (32), описывающей продавливающее усилие F_b , воспринимаемое бетоном. На втором этапе проводится подбор коэффициентов для функций (33)–(35), представляющих собой несущую способность плит с поперечным армированием в рамках разных механизмов разрушения. Коэффициенты x_6 и x_7 в формуле (33) подбираются на основании результатов плит, разрушение которых произошло по контуру установки поперечной арматуры. Поиск коэффициента x_8 выполняется для плит, разрушение которых произошло за гранью контура установки поперечной арматуры; при поиске коэффициентов учитывается форма контура согласно рис. 3. Подбор коэффициента x_9 , используемого в формуле (35), осуществлялся с учетом типа поперечной арматуры (отдельно выполнялся подбор коэффициент для типов $a-c$ и $d-h$ согласно рис. 4) на основании испы-

таний плит, чье разрушение произошло за контуром установки поперечной арматуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате выполнения регрессионного анализа с учетом округления коэффициентов получены выражения (37)–(40):

$$F_b = 1,15 \cdot R_{bt} \cdot u_{\text{СП163}} \cdot h_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{h_0}{d_0}}} \times \left(\frac{\mu \cdot R_s}{R_b} \right)^{1/3} \cdot r_{\lambda}^{-1/4} \cdot \left(\frac{a}{h_0} \right)^{-1/5}, \quad (37)$$

$$\mu = \sqrt{\mu_x \cdot \mu_y};$$

$$F_w = F_b + F_{sw} = F_b + 0,8 \cdot A_{sw} \cdot R_{sw} \cdot F_{sw} \cdot \left(\frac{a}{h_0} \right)^{-1/5} \geq 0,25 \cdot F_b; \quad (38)$$

$$F_{out} = 1,15 \cdot R_{bt} \cdot u_{\text{СП163.out}} \cdot h_0 \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{h_0}{d_0}}} \cdot \left(\frac{\mu \cdot R_s}{R_b} \right)^{1/3} \cdot r_{\lambda}^{-1/4} \cdot \left(\frac{a_{out}}{h_0} \right)^{-1/5}, \quad (39)$$

$$r_{\lambda} \geq 0,25;$$

$$F_{cr} = C \cdot F_b, \quad (40)$$

где μ_x, μ_y — коэффициенты продольного армирования плиты в разных направлениях; $d_0 = 0,1$ м — переходный размер; C — эмпирический коэффициент, зависимый от типа поперечного армирования и при-

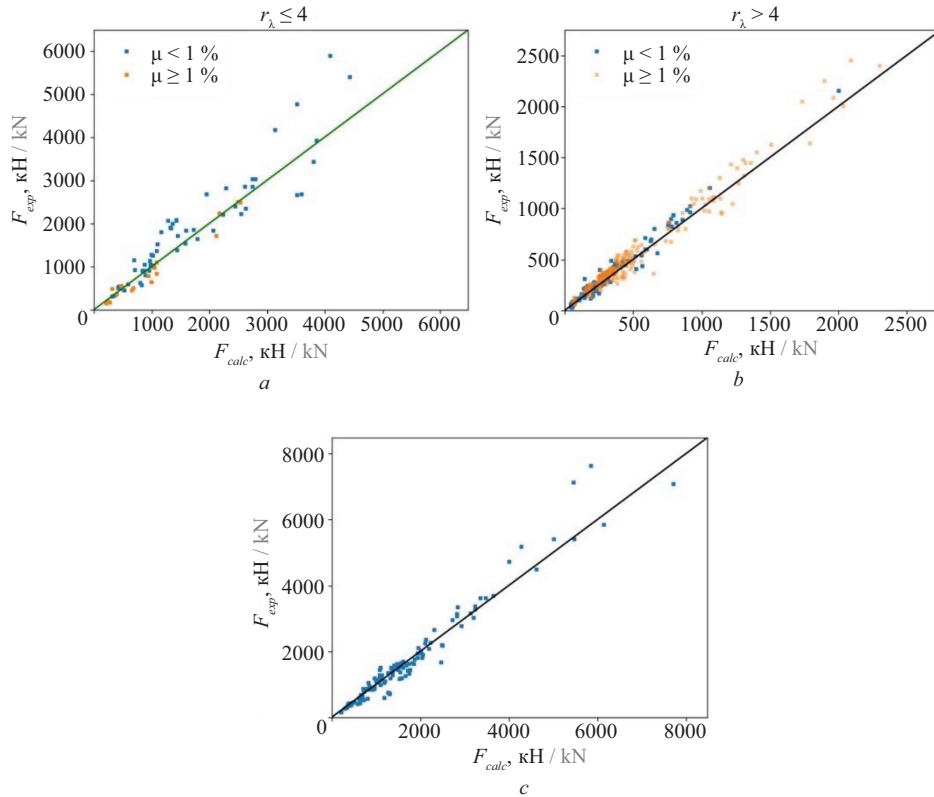


Рис. 12. Сравнение величин предельного продавливающего усилия, полученного в рамках лабораторных испытаний F_{exp} и с помощью регрессионного анализа F_{calc} : *a* — плиты без поперечной арматуры с величиной $r_\lambda \leq 4$; *b* — плиты без поперечной арматуры с величиной $r_\lambda > 4$; *c* — плиты с поперечной арматурой

Fig. 12. Comparison of the punching shear capacity obtained in laboratory tests F_{exp} and regression analysis model F_{calc} : *a* — slabs without shear reinforcement with $r_\lambda \leq 4$; *b* — slabs without shear reinforcement with $r_\lambda > 4$; *c* — slabs with shear reinforcement

Табл. 6. Показатели оценки результатов сравнения F_{exp} и F_{calc} , вычисленной с помощью выражений (37)–(40)

Table 6. Evaluation indicators of F_{exp} and F_{calc} results comparison calculated with expressions (37)–(40)

Показатель Indicator	Плиты без поперечной арматуры Slabs without shear reinforcement				Плиты с поперечной арматурой Slabs with shear reinforcement
	$r_\lambda \leq 4$		$r_\lambda > 4$		
	$\mu < 1\%$	$\mu \geq 1\%$	$\mu < 1\%$	$\mu \geq 1\%$	
<i>CV</i>	0,2	0,24	0,20	0,16	0,18
R^2	0,84	0,95	0,97	0,97	0,96
Минимум F_{exp}/F_{calc} Minimum	0,68	0,61	0,58	0,55	0,55
Максимум F_{exp}/F_{calc} Maximum	1,60	1,48	2,12	1,82	1,52

нимаемый равным 2 для типов *a–c* и 1,5 для типов *d–h* согласно рис. 4. Условие $F_{sw} \geq 0,25 \cdot F_b$ добавлено для обеспечения деформаций, позволяющих выполнить включение поперечной арматуры в работу плиты. Ограничение $r_\lambda \geq 0,25$ добавлено для предотвращения завышения несущей способности плиты.

На рис. 12 представлено сравнение величин предельного продавливающего усилия, полученного в рамках лабораторных испытаний F_{exp} и с помощью выражений (37)–(40) F_{calc} . В табл. 6 приведены показатели оценки сравнения величин F_{exp} и F_{calc} .

Для плит без поперечной арматуры с $r_\lambda \leq 4$ и $\mu < 1\%$ наблюдается хорошее соответствие опытными данным, в остальных случаях отмечается высокое соответствие опытными данным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании результатов, полученных различными исследователями, были выделены основные факторы, оказывающие влияние на несущую способность плит при продавливании. Используя эти факторы, сформирована упрощенная методика, по-

Табл. 7. Показатели оценки результатов сравнения F_{exp} и F_{calc} , вычисленной с помощью разных подходов

Table 7. Evaluation indicators of F_{exp} and F_{calc} results comparison calculated with different approaches

Документ Document	Параметры плиты Parameters of the slab		Показатели оценки результатов Outcome evaluation indicators			
			CV	R^2	Минимум F_{exp}/F_{calc} Minimum	Максимум F_{exp}/F_{calc} Maximum
СП 63.13330 CP 63.13330	$r_{\lambda} \leq 4$	$\mu < 1\%$	0,24	0,80	0,49	1,51
		$\mu \geq 1\%$	0,51	0,70	0,68	3,19
	$r_{\lambda} > 4$	$\mu < 1\%$	0,37	-0,21	0,34	2,50
		$\mu \geq 1\%$	0,26	0,81	0,48	2,21
	Плиты с поперечным армированием / Slabs with shear reinforcement		0,37	0,81	0,62	1,86
Eurocode 2	$r_{\lambda} \leq 4$	$\mu < 1\%$	0,22	0,65	0,74	1,95
		$\mu \geq 1\%$	0,42	0,95	0,75	2,91
	$r_{\lambda} > 4$	$\mu < 1\%$	0,27	0,95	0,70	2,58
		$\mu \geq 1\%$	0,23	0,95	0,63	2,70
	Плиты с поперечным армированием / Slabs with shear reinforcement		0,20	0,83	0,65	1,94
ACI 318-11	$r_{\lambda} \leq 4$	$\mu < 1\%$	0,22	0,60	0,80	2,03
		$\mu \geq 1\%$	0,53	0,92	1,04	4,81
	$r_{\lambda} > 4$	$\mu < 1\%$	0,30	0,76	0,51	3,22
		$\mu \geq 1\%$	0,23	0,81	0,70	3,15
	Плиты с поперечным армированием / Slabs with shear reinforcement		0,27	0,58	0,84	2,93
Model Code 2010	$r_{\lambda} \leq 4$	$\mu < 1\%$	0,22	0,79	0,52	1,48
		$\mu \geq 1\%$	0,49	0,67	0,59	2,67
	$r_{\lambda} > 4$	$\mu < 1\%$	0,22	0,96	0,60	2,27
		$\mu \geq 1\%$	0,20	0,94	0,58	1,91
	Плиты с поперечным армированием / Slabs with shear reinforcement		0,19	0,85	0,67	1,91
Представленная методика The presented method	$r_{\lambda} \leq 4$	$\mu < 1\%$	0,20	0,84	0,68	1,60
		$\mu \geq 1\%$	0,24	0,95	0,61	1,48
	$r_{\lambda} > 4$	$\mu < 1\%$	0,20	0,97	0,58	2,12
		$\mu \geq 1\%$	0,16	0,97	0,55	1,82
	Плиты с поперечным армированием / Slabs with shear reinforcement		0,18	0,96	0,55	1,52

звляющая оценить несущую способность при продавливании. Методика — это набор из четырех выражений, представляющих собой разные механизмы разрушения плиты. С помощью нелинейной регрессии нескольких переменных методом наименьших квадратов с использованием алгоритма Левенберга – Марквардта получены коэффициенты выражений. Коэффициенты подбирались таким образом, чтобы сумма квадратов разностей между величиной несущей способности плиты, полученной в рамках опыта F_{exp} , и несущей способности, полученной с помощью выражений методики F_{calc} , была наименьшей. Данные коэффициенты отражают корреляцию между величиной несущей способности плиты и соответствующими

факторами. В табл. 7 приведено сравнение показателей оценки сопоставления величин F_{exp} и F_{calc} , вычисленной с помощью разных подходов. Жирным шрифтом выделены лучшие показатели среди подходов.

Таким образом, в рамках сравнения с результатами опытных данных представленная методика обладает наименьшим коэффициентом вариации CV , величиной коэффициента детерминации R^2 , наиболее близкой к 1, и величиной максимального отклонения F_{exp}/F_{calc} , наиболее близкой к 1.

В качестве дальнейшего развития методика может быть усовершенствована для учета сосредоточенного изгибающего момента, действующего на опоре, а также преднапряжения плиты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Lips S.* Punching of Flat Slabs with Large Amounts of Shear Reinforcement : Ph.D. Thesis. Lausanne, 2012.
2. *Beutel R., Hegger J.* The effect of anchorage on the effectiveness of the shear reinforcement in the punching zone // *Cement and Concrete Composites*. 2002. Vol. 24. Issue 6. Pp. 539–549. DOI: 10.1016/S0958-9465(01)00070-1
3. *Kueres D.* Two-parameter kinematic theory for punching shear in reinforced concrete slabs : Ph.D. Thesis. Aachen, 2018.
4. *Simones J.T., Ruiz M.F., Muttoni A.* Validation of the Critical Shear Crack Theory for punching of slabs without transverse reinforcement by means of a refined mechanical model // *Structural Concrete*. 2018. Vol. 19. Issue 1. Pp. 191–216. DOI: 10.1002/suco.201700280
5. *Staller M.* Analytische und numerische Untersuchungen des Durchstanztragverhaltens punktgestützter Stahlbetonplatten : Ph.D. Thesis. Munich, 2000.
6. *Lovorovich J.S., McLean D.I.* Punching Shear Behavior of Slabs With Varying Span-Depth Ratios // *ACI Structural Journal*. 1990. Vol. 87. Issue 5. Pp. 507–512. DOI: 10.14359/2616
7. *Simones J.T.* The mechanics of punching in reinforced concrete slabs and footings without shear reinforcement : Ph.D. Thesis. Lausanne, 2018.
8. *Einpaul J.* Punching strength of continuous flat slabs : Ph.D. Thesis. Lausanne, 2016.
9. *Bažant P.Z., Cao Z.* Size Effect in Punching Shear Failure of Slabs // *ACI Structural Journal*. 1987. Vol. 84. Issue 1. Pp. 44–53. DOI: 10.14359/2785
10. *Donmez A., Bažant Z.P.* Size Effect on Punching Strength of Reinforced Concrete Slabs without and with Shear Reinforcement // *ACI Structural Journal*. 2017. Vol. 114. Issue 4. Pp. 875–886. DOI: 10.14359/51689719
11. *Bažant Z., Planas J.* Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials. New York : Routledge, 1998. 640 p. DOI: 10.1201/9780203756799
12. *Oliveira D.R. C., Regan P., Melo G.S.* Punching Resistance of RC Slabs with Rectangular Columns // *Magazine of Concrete Research*. 2004. Vol. 56. Issue 3. Pp. 123–138. DOI: 10.1680/mac.56.3.123.36300
13. *Mangalathu S., Shin H., Choi E., Jeon J.* Explainable machine learning models for punching shear strength estimation of flat slabs without transverse reinforcement // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 39. P. 102300. DOI: 10.1016/j.job.2021.102300
14. *Truong D., To V., Truong G., Jang H.* Engineering punching shear strength of flat slabs predicted by nature-inspired metaheuristic optimized regression system // *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2024. Vol. 18. Issue 4. Pp. 551–567. DOI: 10.1007/s11709-024-1091-1
15. *Guandalini S., Burdet O., Muttoni A.* Punching Tests of Slabs with Low Reinforcement Ratios // *ACI Structural Journal*. 2008. Vol. 106. Issue 1. Pp. 87–95. DOI: 10.14359/56287
16. *Reineck K.H., Beutel R., Duda H., Goossens D., Hallgren M., Kuchma D. et al.* Fib Bulletin 12. Punching of structural concrete slabs // *Fib Bulletins*. 2001. DOI: 10.35789/fib.BULL.0012
17. *Dieterle H., Rostasy F.* Tragverhalten quadratischer Einzelfundamente aus Stahlbeton // *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*. 1987. Vol. 387. Pp. 1–91. DOI: 10.2366/3702692
18. *Rizk E.* Punching shear of thick plates with and without shear reinforcement // *ACI Structural Journal*. 2011. Vol. 108. Issue 5. Pp. 581–591. DOI: 10.14359/51683215
19. *Li K.K.L.* Influence of size on punching shear strength of concrete slabs : master's thesis. Montreal : McGill University, 2000. 92 p.
20. *Hegger J., Ricker M., Ulke B., Ziegler M.* Investigations on the punching behaviour of reinforced concrete footings // *Engineering Structures*. 2007. Vol. 29. Issue 9. Pp. 2233–2241. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.11.012
21. *Siburg C., Hegger J.* Experimental investigations on the punching behaviour of reinforced concrete footings with structural dimensions // *Structural Concrete*. 2014. Vol. 15. Issue 3. Pp. 331–339. DOI: 10.1002/suco.201300083
22. *Sistonen E., Lydman M., Huovinen S.* Teräsbetoni laatan lävistyskapasiteetin laskentakaavan geometrisen malli. Talonrakennustekniikan laboratorio, Teknillinen korkeakoulu, Report No. 69, 1997.
23. *Guidotti R.* Poinçonnement Des Planchers-Dalles Avec Colonnes Superposées Fortement Sollicitées : Ph.D. Thesis. Lausanne, 2010.
24. *Sagaseta J., Muttoni A., Ruiz M.F., Tassinari L.* Non-axis-symmetrical punching shear around internal columns of RC slabs without transverse reinforcement // *Magazine of Concrete Research*. 2011. Vol. 63. Issue 6. Pp. 441–457. DOI: 10.1680/mac.10.00098
25. *Lips S., Ruiz M.F., Muttoni A.* Experimental Investigation on Punching Strength and Deformation Capacity of Shear-Reinforced Slabs // *ACI Structural Journal*. 2012. Vol. 109. Issue 6. Pp. 889–900. DOI: 10.14359/51684132
26. *Kruger G., Burdet O., Favre R.* Punching strength of R.C. Flat slabs with moment transfer // *International Workshop on Punching Shear — Proceedings*. 2000. Pp. 333–341.
27. *Caldentey A.P., Lavaselli P.P., Corres H., Fernandez F.A.* Influence of stirrup detailing on punching shear strength of flat slabs // *Engineering Structures*. 2013. Vol. 49. Pp. 855–865. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.12.032

28. *Bompa D., Onet T.P.* Punching shear strength of RC flat slabs at interior connections to columns // Magazine of Concrete Research. 2015. Vol. 68. Issue 1. Pp. 24–42. DOI: 10.1680/macrc.14.00402
29. *Urban T., Goldyn M., Krawczyk L.* The analysis of the effectiveness of different types of punching shear reinforcement not fully anchored // Budownictwo i Architektura. 2013. Vol. 12. Issue 1. Pp. 195–202. DOI: 10.35784/bud-arch.2192
30. *Simões J.T., Bujnak J., Ruiz F.M., Muttoni A.* Punching shear tests on compact footings with uniform soil pressure // Structural Concrete. 2016. Vol. 17. Issue 4. Pp. 603–617. DOI: 10.1002/suco.201500175
31. *Papanikolaou K.V., Tegos I.A., Kappos A.J.* Punching shear testing of reinforced concrete slabs, and design implications // Magazine of Concrete Research. 2005. Vol. 57. Issue 3. Pp. 167–177. DOI: 10.1680/macrc.2005.57.3.167
32. *Ozden S., Ersoy U., Ozturan T.* Punching shear tests of normal- and high-strength concrete flat plates // Canadian Journal of Civil Engineering. 2006. Vol. 33. Issue 11. Pp. 1389–1400. DOI: 10.1139/106-089
33. *Birkle G., Walter H.D.* Influence of Slab Thickness on Punching Shear Strength // ACI Structural Journal. 2008. Vol. 105. Issue 2. Pp. 180–188. DOI: 10.14359/19733
34. *Al-Yousif A.T., Regan P.E.* Punching resistances of RC slabs supported by large and/or elongated columns // The Structural Engineer. 2003. Vol. 81. Issue 5. Pp. 30–34.
35. *Binici B., Bayrak O.* Punching Shear Strengthening of Reinforced Concrete Flat Plates Using Carbon Fiber Reinforced Polymers // Journal of Structural Engineering. 2003. Vol. 129. Issue 9. Pp. 1173–1182. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:9(1173)
36. *Ghannoum C.M.* Effect of high-strength concrete on the performance of slab-column specimens: master's thesis. Montreal : McGill University, 1998.
37. *Sissakis K., Sheikh S.A.* Strengthening concrete slabs for punching shear with carbon fiber-reinforced polymer laminates // ACI Structural Journal. 2007. Vol. 104. Issue 1. Pp. 49–59. DOI: 10.14359/18432
38. *Li X.* Punching Shear Behaviour of Slab-Column Connections : Ph.D. Thesis. Sheffield, 1997.
39. *Esfahani M.R., Kianoush M.R., Moradi A.R.* Punching Shear Strength of Interior Slab-Column Connections Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets // Engineering Structures. 2009. Vol. 31. Issue 7. Pp. 1535–1542. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.02.021
40. *Michel L., Ferrier E., Bigaud D., Agbossou A.* Criteria for punching failure mode in RC slabs reinforced by externally bonded CFRP // Composite Structures. 2007. Vol. 81. Issue 3. Pp. 438–449. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.09.008
41. *Regan P.E., Samadian F.* Shear Reinforcement against punching in reinforced concrete flat slabs // The Structural Engineer. 2001. Vol. 79. Issue 10. Pp. 24–31.
42. *Kim J.Y., Longworth J.M., Wight R.G., Green M.F.* Punching Shear of Two-way Slabs Retrofitted with Prestressed or Non-prestressed CFRP Sheets // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2010. Vol. 29. Issue 8. Pp. 1206–1223. DOI: 10.1177/07316-84409103143
43. *Rizk E., Marzouk H.* Experimental validation of minimum flexural reinforcement for thick high-strength concrete plates // ACI Structural Journal. 2011. Vol. 108. Issue 3. Pp. 332–340. DOI: 10.14359/51682349
44. *Elshafey A.A., Rizk E., Marzouk H., Hadadara M.R.* Prediction of punching shear strength of two-way slabs // Engineering Structures. 2011. Vol. 33. Issue 5. Pp. 1742–1753. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.02.013
45. *Smadi M.M., Yasin I.S.* Behavior of high-strength fibrous concrete slab-column connections under gravity and lateral loads // Construction and Building Materials. 2008. Vol. 22. Issue 8. Pp. 1863–1873. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.04.023
46. *Faria D.M.V., Lúcio V.J.G., Ramos A.P.* Strengthening of flat slabs with post-tensioning using anchorages by bonding // Engineering Structures. 2011. Vol. 33. Issue 6. Pp. 2025–2043. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.02.039
47. *Cheng M.Y., Parra-Montesinos G.* Evaluation of Steel Fiber Reinforcement for Punching Shear Resistance in Slab-Column Connections — Part I: Monotonically Increased Load // ACI Structural Journal. 2010. Vol. 107. Issue 1. Pp. 101–109. DOI: 10.14359/51663394
48. *Birkle G.* Punching of Flat Slabs: The Influence of Slab Thickness and Stud Layout : Ph.D. Thesis. Calgary, 2004.
49. *Etter S., Heinzmann D., Jäger T., Marti P.* Versuche zum Durchstanverhalten von Stahlbetonplatten. Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, IBK Bericht 324, 2009. DOI: 10.3929/ethz-a-006077853
50. *Hegger J., Häusler F., Ricker M.* Zur maximalen Durchstantragfähigkeit von Flachdecken // Beton- und Stahlbetonbau. 2007. Vol. 102. Issue 11. Pp. 770–777. DOI: 10.1002/best.200700584
51. *Lips S., Muttoni A., Ruiz F.M.* Experimental Investigation on Punching Strength and Deformation Capacity of Shear-Reinforced Slabs // ACI Structural Journal. 2012. Vol. 109. Issue 6. Pp. 889–900. DOI: 10.14359/51684132
52. *Rizk E., Marzouk H., Hussein A.* Punching Shear of Thick Plates with and without Shear Reinforcement // ACI Structural Journal. 2011. Vol. 108. Issue 5. Pp. 581–591. DOI: 10.14359/51683215
53. *Vollum R.L., Abdel-Fattah T., Eder M., Elghazouli A.Y.* Design of ACI-type punching shear reinforcement to Eurocode 2 // Magazine of Concrete Research.

2009. Vol. 62. Issue 1. Pp. 3–16. DOI: 10.1680/macr.2008.62.1.3

54. Schmidt P., Kueres D., Hegger J. Punching shear behavior of reinforced concrete flat slabs with a varying amount of shear reinforcement // *Structural Concrete*. 2020. Vol. 21. Issue 1. Pp. 235–246. DOI: 10.1002/suco.201900017

55. Siburg C., Ricker M., Hegger J. Punching shear design of footings : critical review of different code provisions // *Structural Concrete*. 2020. Vol. 15. Issue 4. Pp. 497–508. DOI: 10.1002/suco.201300092

56. Starosolski W., Zbigniew P., Jasiński R., Drobiec D. Punching shear test of r/c slabs with double headed studs // *Quality and Reliability in Building Industry*. 1999. Vol. 1. Pp. 81–96.

57. Коровин Н.Н., Голубев А.Ю. Продавливание толстых железобетонных плит // *Бетон и железобетон*. 1989. № 11. С. 20–23.

58. Levenberg K. Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares // *Quarterly of Applied Mathematics*. 1944. Vol. 2. Issue 2. Pp. 164–168. DOI: 10.1090/qam/10666

59. Marquardt D.W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters // *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1963. Vol. 11. Issue 2. Pp. 431–441. DOI: 10.1137/0111030

60. Transtrum M.K., Sethna J.P. Improvements to the Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least-squares minimization // *arXiv*. 2012. DOI: 10.48550/arXiv.1201.5885

Поступила в редакцию 18 ноября 2024 г.

Принята в доработанном виде 1 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 1 мая 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Михайлович Бударин — главный специалист отдела расчетных обоснований; Институт «Гидропроект»; 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 2; alex.budarin01@gmail.com;

Олег Юрьевич Ушаков — кандидат технических наук, доцент; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ); 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; Scopus: 57210969288, ResearcherID: B-4747-2016, ORCID: 0000-0002-7514-3108; ushakovleg@yandex.ru;

Линар Салихзанович Сабитов — доктор технических наук, профессор; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 57079229700, ResearcherID: D-2999-2018, ORCID: 0000-0001-7381-9752; SabitovLS@mgsu.ru;

Левон Рафаэлович Маилян — доктор технических наук, профессор; Донской государственный технический университет (ДГТУ); 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; Scopus: 57192662909, ResearcherID: AAO-9095-2020, ORCID: 0000-0003-0162-2699; lrm@aaa.net.ru;

Сергей Сергеевич Сосновских — аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования объектов строительства; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ); 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; sss-10@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Lips S. Punching of Flat Slabs with Large Amounts of Shear Reinforcement : Ph.D. *Thesis*. Lausanne, 2012.

2. Beutel R., Hegger J. The effect of anchorage on the effectiveness of the shear reinforcement in the punching zone. *Cement and Concrete Composites*. 2002; 24(6):539-549. DOI: 10.1016/S0958-9465(01)00070-1

3. Kueres D. Two-parameter kinematic theory for punching shear in reinforced concrete slabs : Ph.D. *Thesis*. Aachen, 2018.

4. Simones J.T., Ruiz M.F., Muttoni A. Validation of the Critical Shear Crack Theory for punching of slabs without transverse reinforcement by means of a refined mechanical model. *Structural Concrete*. 2018; 19(1):191-216. DOI: 10.1002/suco.201700280

5. Staller M. Analytische und numerische Untersuchungen des Durchstantragverhaltens punktgestützter Stahlbetonplatten : Ph.D. *Thesis*. Munich, 2000.

6. Lovorovich J.S., McLean D.I. Punching Shear Behavior of Slabs With Varying Span-Depth Ratios. *ACI Structural Journal*. 1990; 87(5):507-512. DOI: 10.14359/2616

7. Simones J.T. The mechanics of punching in reinforced concrete slabs and footings without shear reinforcement : Ph.D. *Thesis*. Lausanne, 2018.

8. Einpaul J. Punching strength of continuous flat slabs : Ph.D. *Thesis*. Lausanne, 2016.

9. Bažant P.Z., Cao Z. *Size Effect in Punching Shear Failure of Slabs*. *ACI Structural Journal*. 1987; 84(1):44-53. DOI: 10.14359/2785

10. Donmez A., Bažant Z.P. Size Effect on Punching Strength of Reinforced Concrete Slabs without and with Shear Reinforcement. *ACI Structural Journal*. 2017; 114(4):875-886. DOI: 10.14359/51689719
11. Bažant Z., Planas J. *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials*. New York, Routledge, 1998; 640. DOI: 10.1201/9780203756799
12. Oliveira D.R. C., Regan P., Melo G.S. Punching Resistance of RC Slabs with Rectangular Columns. *Magazine of Concrete Research*. 2004; 56(3):123-138. DOI: 10.1680/mac.56.3.123.36300
13. Mangalathu S., Shin H., Choi E., Jeon J. Explainable machine learning models for punching shear strength estimation of flat slabs without transverse reinforcement. *Journal of Building Engineering*. 2021; 39:102300. DOI: 10.1016/j.job.2021.102300
14. Truong D., To V., Truong G., Jang H. Engineering punching shear strength of flat slabs predicted by nature-inspired metaheuristic optimized regression system. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2024; 18(4):551-567. DOI: 10.1007/s11709-024-1091-1
15. Guandalini S., Burdet O., Muttoni A. Punching Tests of Slabs with Low Reinforcement Ratios. *ACI Structural Journal*. 2008; 106(1):87-95. DOI: 10.14359/56287
16. Reineck K.H., Beutel R., Duda H., Goossens D., Hallgren M., Kuchma D. et al. *Fib Bulletin 12. Punching of structural concrete slabs*. *Fib Bulletins*. 2001. DOI: 10.35789/fib.BULL.0012
17. Dieterle H., Rostasy F. Tragverhalten quadratischer Einzelfundamente aus Stahlbeton. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*. 1987; 387:1-91. DOI: 10.2366/3702692
18. Rizk E. Punching shear of thick plates with and without shear reinforcement. *ACI Structural Journal*. 2011; 108(5):581-591. DOI: 10.14359/51683215
19. Li K.K.L. *Influence of size on punching shear strength of concrete slabs : master's thesis*. Montreal, McGill University, 2000; 92.
20. Hegger J., Ricker M., Ulke B., Ziegler M. Investigations on the punching behaviour of reinforced concrete footings. *Engineering Structures*. 2007; 29(9):2233-2241. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.11.012
21. Siburg C., Hegger J. Experimental investigations on the punching behaviour of reinforced concrete footings with structural dimensions. *Structural Concrete*. 2014; 15(3):331-339. DOI: 10.1002/suco.201300083
22. Sistonen E., Lydman M., Huovinen S. *Teräsbetoni-laatan lävistyskapasiteetin laskentakaavan geometriinen malli*. Talonrakennustekniikan laboratorio, Teknillinen korkeakoulu, Report No. 69, 1997.
23. Guidotti R. Poinçonnement Des Planchers-Dalles Avec Colonnes Superposées Fortement Sollicitées : Ph.D. Thesis. Lausanne, 2010.
24. Sagaseta J., Muttoni A., Ruiz M.F., Tassinari L. Non-axis-symmetrical punching shear around internal columns of RC slabs without transverse reinforcement. *Magazine of Concrete Research*. 2011; 63(6):441-457. DOI: 10.1680/mac.10.00098
25. Lips S., Ruiz M.F., Muttoni A. Experimental Investigation on Punching Strength and Deformation Capacity of Shear-Reinforced Slabs. *ACI Structural Journal*. 2012; 109(6):889-900. DOI: 10.14359/51684132
26. Kruger G., Burdet O., Favre R. Punching strength of R.C. Flat slabs with moment transfer. *International Workshop on Punching Shear — Proceedings*. 2000; 333-341.
27. Caldentey A.P., Lavaselli P.P., Corres H., Fernandez F.A. Influence of stirrup detailing on punching shear strength of flat slabs. *Engineering Structures*. 2013; 49:855-865. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.12.032
28. Bompa D., Onet T.P. Punching shear strength of RC flat slabs at interior connections to columns. *Magazine of Concrete Research*. 2015; 68(1):24-42. DOI: 10.1680/mac.14.00402
29. Urban T., Goldyn M., Krawczyk L. The analysis of the effectiveness of different types of punching shear reinforcement not fully anchored. *Budownictwo i Architektura*. 2013; 12(1):195-202. DOI: 10.35784/bud-arch.2192
30. Simões J.T., Bujnak J., Ruiz F.M., Muttoni A. Punching shear tests on compact footings with uniform soil pressure. *Structural Concrete*. 2016; 17(4):603-617. DOI: 10.1002/suco.201500175
31. Papanikolaou K.V., Tegos I.A., Kappos A.J. Punching shear testing of reinforced concrete slabs, and design implications. *Magazine of Concrete Research*. 2005; 57(3):167-177. DOI: 10.1680/mac.2005.57.3.167
32. Ozden S., Ersoy U., Ozturan T. Punching shear tests of normal- and high-strength concrete flat plates. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2006; 33(11):1389-1400. DOI: 10.1139/106-089
33. Birkle G., Walter H.D. Influence of Slab Thickness on Punching Shear Strength. *ACI Structural Journal*. 2008; 105(2):180-188. DOI: 10.14359/19733
34. Al-Yousif A.T., Regan P.E. Punching resistances of RC slabs supported by large and/or elongated column. *The Structural Engineer*. 2003; 81(5):30-34
35. Binici B., Bayrak O. Punching Shear Strengthening of Reinforced Concrete Flat Plates Using Carbon Fiber Reinforced Polymers. *Journal of Structural Engineering*. 2003; 129(9):1173-1182. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:9(1173)
36. Ghannoum C.M. *Effect of high-strength concrete on the performance of slab-column specimens : master's thesis*. Montreal, McGill University, 1998.
37. Sissakis K., Sheikh S.A. Strengthening concrete slabs for punching shear with carbon fiber-reinforced polymer laminates. *ACI Structural Journal*. 2007; 104(1):49-59. DOI: 10.14359/18432
38. Li X. *Punching Shear Behaviour of Slab-Column Connections : Ph.D. Thesis*. Sheffield, 1997.

39. Esfahani M.R., Kianoush M.R., Moradi A.R. Punching Shear Strength of Interior Slab-Column Connections Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets. *Engineering Structures*. 2009; 31(7):1535-1542. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.02.021
40. Michel L., Ferrier E., Bigaud D., Agbossou A. Criteria for punching failure mode in RC slabs reinforced by externally bonded CFRP. *Composite Structures*. 2007; 81(3):438-449. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.09.008
41. Regan P.E., Samadian F. Shear Reinforcement against punching in reinforced concrete flat slabs. *The Structural Engineer*. 2001. 79(10):24-31.
42. Kim J.Y., Longworth J.M., Wight R.G., Green M.F. Punching Shear of Two-way Slabs Retrofitted with Prestressed or Non-prestressed CFRP Sheets. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2010; 29(8):1206-1223. DOI: 10.1177/0731684409103143
43. Rizk E., Marzouk H. Experimental validation of minimum flexural reinforcement for thick high-strength concrete plates. *ACI Structural Journal*. 2011; 108(3):332-340. DOI: 10.14359/51682349
44. Elshafey A.A., Rizk E., Marzouk H., Haddara M.R. Prediction of punching shear strength of two-way slabs. *Engineering Structures*. 2011; 33(5):1742-1753. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.02.013
45. Smadi M.M., Yasin I.S. Behavior of high-strength fibrous concrete slab-column connections under gravity and lateral loads. *Construction and Building Materials*. 2008; 22(8):1863-1873. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.04.023
46. Faria D.M.V., Lúcio V.J.G., Ramos A.P. Strengthening of flat slabs with post-tensioning using anchorages by bonding. *Engineering Structures*. 2011; 33(6):2025-2043. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.02.039
47. Cheng M.Y., Parra-Montesinos G. Evaluation of Steel Fiber Reinforcement for Punching Shear Resistance in Slab-Column Connections — Part I: Monotonically Increased Load. *ACI Structural Journal*. 2010; 107(1):101-109. DOI: 10.14359/51663394
48. Birkle G. Punching of Flat Slabs: The Influence of Slab Thickness and Stud Layout : Ph.D. Thesis. Calgary, 2004.
49. Etter S., Heinzmann D., Jäger T., Marti P. *Ver-suche zum Durchstanverhalten von Stahlbetonplatten*. Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, IBK Bericht 324, 2009. DOI: 10.3929/ethz-a-006077853
50. Hegger J., Häusler F., Ricker M. Zur maximalen Durchstantragfähigkeit von Flachdecken. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2007; 102(11):770-777. DOI: 10.1002/best.200700584
51. Lips S., Muttoni A., Ruiz F.M. Experimental Investigation on Punching Strength and Deformation Capacity of Shear-Reinforced Slabs. *ACI Structural Journal*. 2012; 109(6):889-900. DOI: 10.14359/51684132
52. Rizk E., Marzouk H., Hussein A. Punching Shear of Thick Plates with and without Shear Reinforcement. *ACI Structural Journal*. 2011; 108(5):581-591. DOI: 10.14359/51683215
53. Vollum R.L., Abdel-Fattah T., Eder M., Elghazouli A.Y. Design of ACI-type punching shear reinforcement to Eurocode 2. *Magazine of Concrete Research*. 2009; 62(1):3-16. DOI: 10.1680/macr.2008.62.1.3
54. Schmidt P., Kueres D., Hegger J. Punching shear behavior of reinforced concrete flat slabs with a varying amount of shear reinforcement. *Structural Concrete*. 2020; 21(1):235-246. DOI: 10.1002/suco.201900017
55. Siburg C., Ricker M., Hegger J. Punching shear design of footings: critical review of different code provisions. *Structural Concrete*. 2020; 15(4):497-508. DOI: 10.1002/suco.201300092
56. Starosolski W., Zbigniew P., Jasiński R., Drobiec D. Punching shear test of r/c slabs with double headed studs. *Quality and Reliability in Building Industry*. 1999; 1:81-96.
57. Korovin N.N., Golubev A.Yu. Punching shear of the thick reinforced concrete slabs. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1989; 11:20-23. (rus.).
58. Levenberg K. Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares. *Quarterly of Applied Mathematics*. 1944; 2(2):164-168. DOI: 10.1090/qam/10666
59. Marquardt D.W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1963; 11(2):431-441. DOI: 10.1137/0111030
60. Transtrum M.K., Sethna J.P. Improvements to the Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least-squares minimization. *ArXiv*. 2012. DOI: 10.48550/arXiv.1201.5885

Received November 18, 2024.

Adopted in revised form on May 1, 2025.

Approved for publication on May 1, 2025.

BIONOTES: Alexander M. Budarin — chief specialist of the calculation justification department; **Institute Hydro-project**; 2 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; alex.budarin01@gmail.com;

Oleg Yu. Ushakov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU)**; 19 Mira st., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation; Scopus: 57210969288, ResearcherID: B-4747-2016, ORCID: 0000-0002-7514-3108; ushakovoleg@yandex.ru;

Linar S. Sabitov — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 57079229700, ResearcherID: D-2999-2018, ORCID: 0000-0001-7381-9752; l.sabitov@bk.ru;

Levon R. Mailyan — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Don State Technical University (DSTU)**; 1 Gagarin square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation; Scopus: 57192662909, ResearcherID: AAO-9095-2020, ORCID: 0000-0003-0162-2699; lrm@aaa.net.ru;

Sergey S. Sosnovskikh — postgraduate student of the Department of Computer-Aided Design Systems for Construction Projects; **Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU)**; 19 Mira st., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation; ccc-10@mail.ru.

*Contribution of the authors: all authors made equivalent contributions to the preparation of the publication.
The authors declare no conflicts of interests.*

Оценка надежности системы «сооружение – многослойное основание» с учетом жесткости, мощности и конфигурации слоев

Валерия Александровна Пшеничкина, Станислав Юрьевич Иванов,
Сергей Сергеевич Рекунов, Алексей Александрович Чураков

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные исследования, посвященные количественной оценке надежности сооружений при землетрясении, как правило, не учитывают волновые эффекты, пространственную неоднородность грунтового основания и обратное воздействие сооружения на движение грунта. Цель исследования — оценка надежности системы «сооружение – многослойное основание» с учетом влияния таких факторов, как жесткость сооружения, толщина и плотность слоев грунта, скорость распространения поперечной сейсмической волны, несущая частота сейсмического воздействия. Мерой надежности системы принята вероятность превышения коэффициента динамичности заданного значения.

Материалы и методы. Используется расчетная модель горизонтальной слоистой среды. Сооружение рассматривается как элемент слоистой системы с приведенными жесткостными характеристиками. Сейсмическая нагрузка в виде вертикальной распространяющейся сдвиговой волны моделируется стационарным случайным процессом. Выходные характеристики системы — спектральная плотность ускорения, амплитудно-частотная характеристика и коэффициент динамичности на любом уровне каждого слоя и сооружения. По результатам серии расчетов коэффициент динамичности формулируется как нелинейная функция шести случайных аргументов. Линеаризация функции проводится методом планирования эксперимента. Строится функция надежности.

Результаты. Получены аналитические зависимости функции коэффициента динамичности для двух вариантов основания с повышенными и пониженными значениями жесткости слоев с различным порядком их чередования. Выполнена оценка адекватности принятой линейной модели. Установлены вероятности превышения нормативного значения коэффициента динамичности для зданий различной жесткости с учетом влияния мощности грунтового основания.

Выводы. Принятый в нормах коэффициент динамичности, который для всех категорий грунтов не превышает значения 2,5, не может обеспечить требуемый уровень надежности сейсмостойких зданий и должен определяться на основе расчетов с учетом жесткости сооружения и характеристик многослойного основания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оценка надежности, система «сооружение – основание», многослойное основание, коэффициент динамичности, амплитудно-частотная характеристика, нелинейная функция случайных аргументов, метод планирования эксперимента, вероятностный расчет

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пшеничкина В.А., Иванов С.Ю., Рекунов С.С., Чураков А.А. Оценка надежности системы «сооружение – многослойное основание» с учетом жесткости, мощности и конфигурации слоев // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 6. С. 888–898. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.888-898

Автор, ответственный за переписку: Станислав Юрьевич Иванов, stassuz-1-14@yandex.ru.

Reliability assessment of the system “structure – multilayer foundation” taking into account stiffness, capacity and configuration of layers

Valeria A. Pshenichkina, Stanislav Yu. Ivanov, Sergey S. Rekunov, Alexey A. Churakov
Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Modern studies on the quantitative assessment of the reliability of structures during earthquakes generally do not consider wave effects, the spatial heterogeneity of soil foundations, and the reverse impact of the structure on ground motion. The purpose of this work is to evaluate the reliability of the “structure – multilayer foundation” system, considering factors such as stiffness of the structure, the thickness and density of soil layers, the propagation speed of the transverse seismic wave, and the dominant frequency of seismic action. The reliability measure of the system is taken as the probability of the dynamic coefficient exceeding a specified value.

Materials and methods. A computational model of a horizontally layered medium is used. The structure is considered an element of the layered system with equivalent rigidity characteristics. Seismic loading in the form of a vertically propagat-

ing shear wave is modelled as a stationary random process. The output characteristics of the system include the spectral density of acceleration, the amplitude — frequency response, and the dynamic coefficient at any level of each layer and the structure. Based on a series of calculations, the dynamic coefficient is formulated as a nonlinear function of six random arguments. The function is linearized using the experimental design method, and the reliability function is constructed.

Results. Analytical dependencies of the dynamic coefficient function were obtained for two types of foundations with increased and decreased stiffness values of layers, with different orders of their alternation. An assessment of the adequacy of the adopted linear model was conducted. The probabilities of exceeding the normative value of the dynamic coefficient were determined for buildings of varying rigidity, considering the influence of the thickness of the soil foundation layers.

Conclusions. The dynamic coefficient adopted in the standards, which does not exceed 2.5 for all soil categories, cannot ensure the required reliability level of earthquake — resistant buildings and should be determined based on calculations that account for the rigidity of the structure and the characteristics of the multilayer foundation.

KEYWORDS: reliability assessment, “structure – foundation” system, multilayer foundation, dynamic coefficient, amplitude-frequency characteristic, nonlinear function of random arguments, the method of experimental design, probabilistic calculation

FOR CITATION: Pshenichkina V.A., Ivanov S.Yu., Rekunov S.S., Churakov A.A. Reliability assessment of the system “structure – multilayer foundation” taking into account stiffness, capacity and configuration of layers. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(6):888-898. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.888-898 (rus.).

Corresponding author: Stanislav Yu. Ivanov, stassuz-1-14@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие строительных объектов с многослойными основаниями во время землетрясений — актуальная тема сейсмостойкого проектирования на протяжении многих лет. Однако проблема остается нерешенной в полной мере, что связано со сложностью моделирования динамических процессов в неоднородном грунтовом основании, нелинейной работой грунтов и сооружений, а также высокой степенью неопределенности исходных данных [1, 2].

Особенностями геологического строения основания являются его слоистая структура и статистическая изменчивость расчетных параметров, таких как плотность, скорость прохождения упругих волн и толщина слоев. Эти характеристики в значительной степени определяют сейсмический отклик системы «сооружение – основание». Исследование таких систем возможно только на вероятностной основе. Как подчеркивается в работе [3], именно вероятностный подход играет важную роль в понимании неопределенностей в проектировании и обеспечивает рациональный и риск-информированный подход к анализу геотехнических систем.

Ключевые положения статистической теории сейсмостойкости, включающей теорию сейсмического риска, динамику сооружений и теорию надежности, разработаны В.В. Болотиным [4]. Общая схема оценки сейсмической надежности сооружений состоит из следующих этапов:

- установления вероятностных характеристик сейсмического воздействия (интенсивность, спектральный состав, продолжительность интенсивной фазы);
- описания динамического поведения конструкций под действием сейсмического сотрясения основания с учетом нелинейных эффектов вплоть до достижения аварийного состояния;
- оценки показателей риска уязвимости конструкций как условной и полной вероятности превышения ее расчетных параметров.

Современные исследования направлены на изучение главных аспектов статистической теории сейсмостойкости.

В труде [5] отмечается, что величина сейсмической надежности определяется интегралом, состоящим из двух функций: первая — это «кривая сейсмической опасности», основанная на распределениях сейсмичности и интенсивности колебаний грунта; вторая — условные распределения реакций конструкций. Исследуются различные подходы к оценке этих функций и их зависимостей.

Авторы публикаций [6, 7] анализируют вероятность сейсмического разрушения для отдельных видов конструкций.

В статье [8] рассматривается функция несущей способности на базе предельного сдвига основания железобетонных каркасных зданий. Предложен новый полуаналитический метод оценки сейсмической надежности конструкций в нелинейной постановке, который включает в себя метод точечной оценки, анализ статической нелинейности (pushover analysis) и метод первого порядка надежности FORM¹. Получены некоторые закономерности сейсмической надежности конструкций в зависимости от коэффициента вариации сейсмического воздействия и коэффициентов корреляции сейсмических сил на уровне этажей.

На примере многопролетного сталебетонного композитного моста [9] исследуется влияние неопределенностей, связанных с величиной сейсмической опасности и уязвимостью конструкций сооружения. Результаты показали, что выбор модели для прогнозирования движения грунта, нелинейный метод моделирования и количество записей землетрясений, принятых для анализа, являются факторами, которые вносят наибольший вклад в изменчивость индекса сейсмической надежности.

В настоящее время подавляющее большинство исследований сосредоточено на оценке сейсмиче-

¹ EN 1990:2002. Eurocode 0: Basis of Structural Design. Brussels : European Committee for Standardization (CEN), 2002. 105 p.

ской надежности непосредственно конструкций зданий и сооружений. Объединенная система «конструкция – фундамент – грунт» часто игнорируется при проведении аналитического или численного динамического анализа [10].

Вместе с тем функция распределения интенсивности колебаний грунта в значительной степени зависит от пространственной неоднородности и неопределенности его расчетных характеристик, а также от соотношения жесткостей сооружения и основания.

Представлены результаты изучения распространения сейсмической волны в виде белого шума в многослойном грунте со случайной толщиной слоев и случайным распределением модуля сдвига по профилю грунта [11]. Установлено влияние этих параметров на характер передаточных функций отклика системы. Многослойность грунта со случайными параметрами мощности слоев приводит к усилению среднего движения на дневной поверхности грунта по сравнению с реакцией однородного многослойного основания с детерминированными характеристиками и смещению собственных частот в сторону более высоких значений. В работе [12] также сделан вывод, что стохастический характер грунта влияет на изменчивость спектров отклика на его поверхности.

Ряд публикаций посвящен вероятностному анализу влияния на сейсмический отклик системы

«сооружение – основание» следующих параметров: модуль сдвига и коэффициент демпфирования грунта [13], соотношение модулей сдвига грунта и конструкции [14], скорость распространения поперечных волн в грунте, толщина однородного слоя и высота конструкции [15].

Цель настоящего исследования — оценка надежности системы «сооружение – многослойное основание» с учетом влияния таких факторов, как жесткость сооружения, мощность и плотность слоев грунта, скорость распространения поперечной сейсмической волны, несущая частота сейсмического воздействия. В качестве критерия надежности системы принят коэффициент динамичности. Используется волновая модель слоистой среды, которая впервые была предложена в трудах А.П. Сеницына, Э.Е. Хачияна и Е.С. Медведевой [16, 17] для анализа взаимодействия системы «сооружение – основание».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматривается вероятностная задача колебаний системы «сооружение – многослойное основание» под действием случайной сейсмической нагрузки.

Расчетная схема системы с произвольным количеством слоев, основанная на волновой модели горизонтальной слоистой среды, приведена на рис. 1.

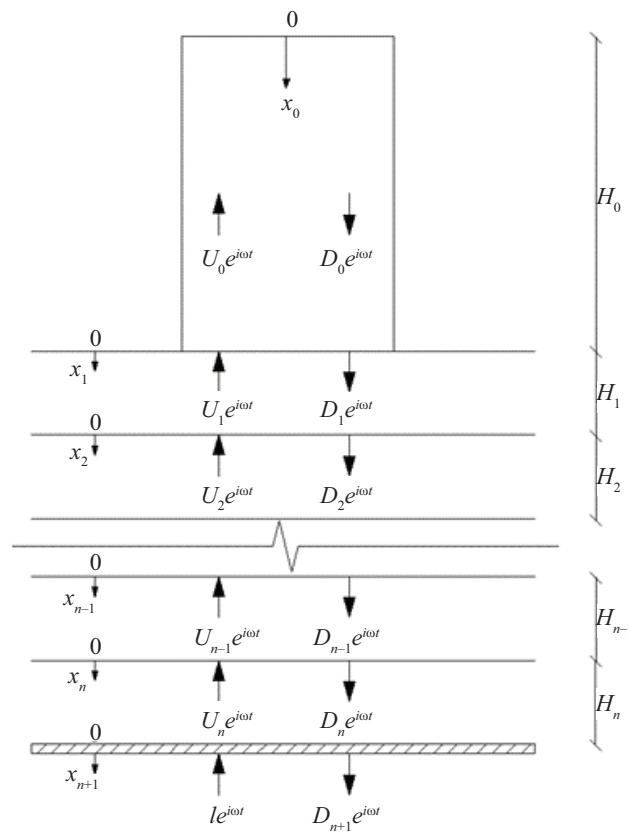


Рис. 1. Расчетная модель системы «сооружение – многослойное основание»

Fig. 1. Calculation model of the system “structure – multilayer foundation”

Каждый k -й слой ($k = 0, 1, 2 \dots, n + 1$) имеет следующие характеристики: скорость распространения поперечных волн V_k , модуль сдвига G_k , плотность ρ_k , мощность H_k .

Характеристики подстилающего упругого полупространства V_{n+1} , G_{n+1} , ρ_{n+1} . Сооружение в виде сдвигаемого бруса заменяется однородным слоем с приведенными характеристиками V_0 , G_0 , ρ_0 .

Принимаем вертикальное распространение сейсмической волны $\tilde{f}(t)$. Колебания каждого k -го слоя определяются взаимодействием выходящей из $(k + 1)$ -го слоя волны $U_k \cdot \tilde{f}(t)$ и отраженной от границы с $(k - 1)$ -м слоем волны $V_k \cdot \tilde{f}(t)$.

Подробно решение задачи свободных и вынужденных колебаний системы с учетом демпфирования изложено в предыдущих работах авторов [18, 19].

Сейсмическое ускорение грунтового основания задаем в виде стационарной случайной функции $\tilde{f}(t)$ с нулевым математическим ожиданием $m_f(t) = 0$ и спектральной плотностью $S_f(\omega)$. Спектральную плотность выходной случайной функции ускорений многослойной системы $\tilde{F}(x, t)$ находим методом канонических разложений:

$$S_f(\omega, x) = |h(\omega, x)|^2 S_f(\omega), \quad (1)$$

где $h(\omega, x)$ — амплитудно-частотная характеристика:

$$h(\omega, x) = \frac{F(\omega, x)}{F_{n+1}(\omega, 0)}; \quad x = 0, \dots, H; \quad H_j = H_0 + H_1 + \dots + H_n. \quad (2)$$

Дисперсия выходной случайной функции $\tilde{F}(x, t)$:

$$D_F(x) = \int_0^\infty S_f(\omega, x) d\omega. \quad (3)$$

Коэффициент динамичности системы вычисляем как отношение стандартов ускорений выходной и входной случайных функций:

$$\beta(x) = \sqrt{\frac{D_F(x)}{D_{F_{n+1}}}} \approx \sqrt{\frac{D_F(x)}{2}}, \quad (4)$$

где дисперсия $D_{F_{n+1}}$ равна сумме дисперсий падающей и отраженной волны на границе подстилающего слоя коренных пород.

Выходные параметры системы — амплитудно-частотная характеристика и коэффициент динамичности $\beta(x)$ зависят от геометрических и жесткостных характеристик грунтового основания, сооружения, а также спектра частот сейсмического воздействия. Рассматриваем коэффициент динамичности в виде функции:

$$\beta = \beta(x, V_k, H_k, \beta_s), \quad (5)$$

где β_s — несущая частота спектральной плотности $S_f(\omega)$; V_k, H_k, β_s — случайные величины с нормальным законом распределения.

В данной постановке функция $\beta(x, V_k, H_k, \beta_s)$ представляет собой нелинейную функцию случайных аргументов. Для линеаризации функции применяем метод планирования эксперимента. Получив уравнения регрессии, проводим оценку надежности системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Решение задачи оценки надежности системы «здание – основание» выполняем на примере двухслойного основания, сложенного жестким и слабым грунтом с двумя вариантами расположения слоев (рис. 2). Границы интервала варьирования факторов представлены в табл. 1.

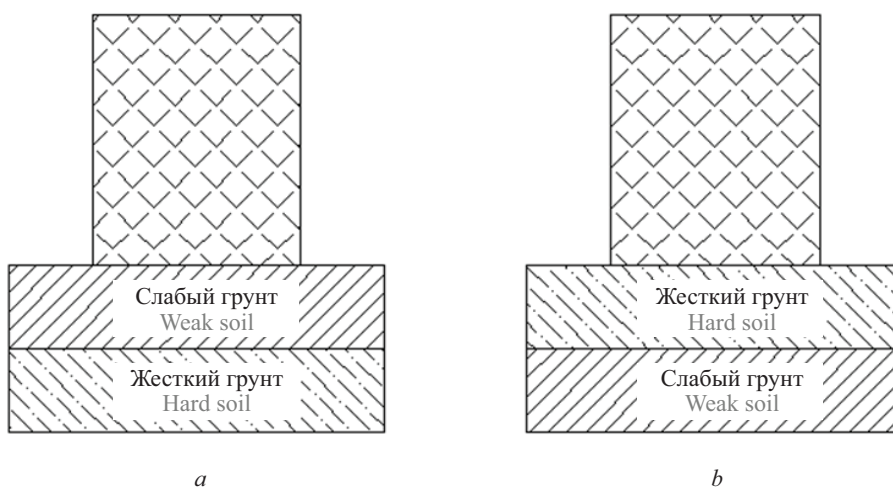


Рис. 2. Варианты системы «сооружение – основание»: а — вариант 1; б — вариант 2

Fig. 2. Variants of the “building – base” system: a — option 1; b — option 2

Табл. 1. Границы интервала варьирования факторов

Table 1. Limits of the factor variation interval

Уровни факторов Levels of factors	Фактор Factor	V_0 , км/с km/s	V_1 , км/с km/s	V_2 , км/с km/s	H_1 , м m	H_2 , м m	β_s , с ⁻¹ s ⁻¹
Среднее / Average		0,55	0,21	0,7	17,5	17,5	19,5
-		$\frac{0,2}{0,9}$	$\frac{0,0952}{0,3248}$	$\frac{0,6016}{0,7984}$	$\frac{5}{30}$	$\frac{5}{30}$	$\frac{9}{30}$
+							

Принимаем линейное уравнение регрессии вида:

$$\beta = b_0 + b_1 \cdot V_0 + b_2 \cdot V_1 + b_3 \cdot V_2 + b_4 \cdot H_1 + b_5 \cdot H_2 + b_6 \cdot \beta_s \quad (6)$$

где b_i — коэффициенты регрессии; V_i — скорости прохождения волны в соответствующем слое; H_i — высота соответствующего слоя; β_s — несущая частота сейсмической нагрузки.

Результаты расчета позволяют сделать вывод, что практически все исследуемые параметры оказывают существенное влияние на коэффициент динамичности.

Переходя от кодированных к натуральным значениям факторов, получим функции коэффициента динамичности на уровне верха здания $\beta(0)$, на линии контакта здания с основанием $\beta(H)$ и относительного коэффициента динамичности $\beta = \beta(0) - \beta(H)$ для двух вариантов расположения слоев грунта:

1. Система «здание – слабый слой – жесткий слой»:

$$\beta(0) = 1,3753 - 0,00287 \cdot V_0 + 0,0083 \cdot V_1 + 0,00009 \cdot V_2 + 0,069 \cdot H_1 + 0,091 \cdot H_2 + 0,0689 \cdot \beta_s;$$

$$\beta(H) = 1,3569 - 0,0007 \cdot V_0 - 0,0011 \cdot V_1 - 0,0005 \cdot V_2 + 0,0326 \cdot H_1 + 0,0387 \cdot H_2 + 0,0117 \cdot \beta_s; \quad (7)$$

$$\beta = 0,0185 - 0,0022 \cdot V_0 + 0,0019 \cdot V_1 + 0,0005 \cdot V_2 + 0,0364 \cdot H_1 + 0,052 \cdot H_2 + 0,0572 \cdot \beta_s.$$

2. Система «здание – жесткий слой – слабый слой»:

$$\beta(0) = 1,3874 - 0,00195 \cdot V_0 + 0,0012 \cdot V_1 + 0,0048 \cdot V_2 + 0,0105 \cdot H_1 + 0,0414 \cdot H_2 + 0,0116 \cdot \beta_s;$$

$$\beta(H) = 1,4098 - 0,00007 \cdot V_0 + 0,00003 \cdot V_1 + 0,0005 \cdot V_2 + 0,0017 \cdot H_1 + 0,0168 \cdot H_2 - 0,0132 \cdot \beta_s; \quad (8)$$

$$\beta = -0,0224 - 0,0019 \cdot V_0 + 0,0012 \cdot V_1 + 0,0043 \cdot V_2 + 0,0088 \cdot H_1 + 0,0247 \cdot H_2 + 0,0249 \cdot \beta_s.$$

Для оценки адекватности принятой модели линейной регрессии для аппроксимации функции

коэффициента динамичности используем коэффициент детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (9)$$

Для уравнения (7) коэффициент детерминации составляет 0,84, а для уравнения 8 — 0,61. Оба значения показывают, что полученные линейные зависимости с достаточной степенью адекватности соответствуют данным, на которых они построены.

С целью визуализации 6-мерной функции относительного коэффициента динамичности и ее линейного приближения в табл. 2 приведены плоскостные сечения, на которых одна переменная меняет значения, а остальные фиксированы на уровне математических ожиданий.

Максимальная усредненная по всем графикам погрешность линеаризации составляет 10,21 % для варианта 1 и 28,9 % для варианта 2.

Функция для варианта 2 хуже поддается линеаризации и требует применения более сложных моделей. Наличие нижнего слабого слоя придает системе «сооружение – многослойное основание» ярко выраженный нелинейный характер. Линейная аппроксимация, за исключением отдельных сечений, приводит к завышению коэффициента динамичности.

Построение функции надежности

Коэффициент динамичности системы «сооружение – многослойное основание» рассматривается в виде линейной функции шести аргументов. Как было установлено в предыдущих исследованиях [18, 19], все из аргументов оказывают значительное влияние на величину коэффициента динамичности. При этом каждый из аргументов может рассматриваться как случайная величина. Вместе с тем в настоящем исследовании авторы считают целесообразным провести оценку функции надежности с учетом статистической изменчивости только трех параметров: скоростей поперечных волн в грунтовом основании V_1 и V_2 , а также несущей частоты сейсмических колебаний грунта β_s . Остальные параметры рассматриваем детерминированными

Табл. 2. Плоскостные сечения функции относительного коэффициента динамичности для вариантов системы: 1 — «здание – слабый слой – жесткий слой»; 2 — «здание – жесткий слой – слабый слой»

Table 2. Flat-walled sections of the relative coefficient of dynamism function for system variants: 1 — “building – weak layer – hard layer”; 2 — “building – hard layer – weak layer”

Переменный параметр Variable parameter	Двухмерные проекции Two-dimensional projections	
	Вариант 1 Option 1	Вариант 2 Option 2
<p>Скорость распространения сдвиговой волны в здании V_0, м/с² The speed of the shear wave propagation in the building, V_0, m/s²</p> <p>Средняя погрешность 1 — 10,2 % 2 — 15,6 % Average error</p>		
<p>Скорость распространения поперечной волны в слое 1 V_1, м/с² The velocity of the transverse wave propagation in layer 1, V_1, m/s²</p> <p>Средняя погрешность 1 — 6,8 % 2 — 23,4 % Average error</p>		
<p>Скорость распространения поперечной волны в слое 2 V_2, м/с² The velocity of the transverse wave propagation in layer 2 V_2, m/s²</p> <p>Средняя погрешность 1 — 10,1 % 2 — 21,2 % Average error</p>		
<p>Мощность слоя 1 H_1, м Thickness of layer 1 H_1, m</p> <p>Средняя погрешность 1 — 8,2 % 2 — 24,1 % Average error</p>		

Переменный параметр Variable parameter	Двухмерные проекции Two-dimensional projections	
	Вариант 1 Option 1	Вариант 2 Option 2
Мощность слоя 2 H_2 , м Thickness of layer 2, H_2 , m Средняя погрешность 1 — 6,7 % 2 — 28,9 % Average error		
Несущая частота сейсмического воздействия β_s , с ⁻¹ Carrier frequency of seismic impact, β_s , с ⁻¹ Средняя погрешность 1 — 10,3 % 2 — 25,4 % Average error		

ми, и функцию надежности строим для отдельных значений этих параметров.

Параметр V_0 — приведенная скорость распространения поперечных волн по высоте здания с интервалом варьирования 200–900 м/с соответствует зданиям с периодом колебаний T от 1,2 до 0,17 с.левой границе интервала соответствуют гибкие здания, правой — жесткие [17].

Параметры H_1 и H_2 — мощности грунтовых слоев.

Параметр β_s — параметр спектральной плотности случайной функции ускорения грунтового основания:

$$S_f(\omega) = D_f \frac{2\alpha}{\pi} \left(\frac{m^2 + \omega^2}{m^2 + 2\alpha\omega^2 + \omega^4} \right), \quad (10)$$

где $m^2 = a^2 + \beta_s^2$; $a^2 = a^2 - \beta_s^2$.

Статистические характеристики случайных аргументов представлены в табл. 3.

Закон распределения β как линейной функции нормально распределенных некоррелированных случайных аргументов близок к нормальному с математическим ожиданием:

$$m_\beta = \sum_{i=1}^3 \bar{b}_i m_{\bar{x}_i} + \bar{b}_0 \quad (11)$$

и дисперсией:

$$D_\beta = \sum_{i=1}^3 \bar{b}_i^2 D_{\bar{x}_i}. \quad (12)$$

В формулах (10), (11) \bar{b}_i, \bar{b}_0 — натуральные значения коэффициентов регрессии:

$$\bar{X} = (\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3) = (V_1, V_2, \beta_s). \quad (13)$$

1. Система «здание – слабый грунт – жесткий грунт».

Функция относительного коэффициента динамичности:

$$\beta = 0,0185 - 0,0022 \cdot V_0 + 0,0019 \cdot V_1 + 0,0005 \times V_2 + 0,0364 \cdot H_1 + 0,052 \cdot H_2 + 0,0572 \cdot \beta_s.$$

Математическое ожидание $m_\beta = 2,22$, дисперсия $D_\beta = 0,153$, стандарт:

$$\sigma_\beta = \sqrt{D_\beta} = 0,391.$$

Тогда плотность распределения функции коэффициента динамичности равна:

$$p(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_\beta} \cdot e^{-\frac{(m_\beta - \beta)^2}{2\sigma_\beta^2}}. \quad (14)$$

Функция распределения:

$$F(\beta) = \int_{-\infty}^{\beta} p(\beta) d\beta. \quad (15)$$

При средних значениях детерминированных параметров вероятность превышения нормативного значения коэффициента динамичности составляет:

$$P(\beta > 2,5) = 1 - F(2,5) = 0,237.$$

Принимаем вероятность $P(\beta > \beta_{01}) = 0,1$ и находим соответствующее значение коэффициента дина-

Табл. 3. Статистические характеристики случайных аргументов

Table 3. Statistical characteristics of random arguments

Параметр Parameter	V_1 , м/с m/s	V_2 , м/с m/s	β_s , с ⁻¹ s ⁻¹
<i>Вариант 1: «Здание – слабый грунт – жесткий грунт»</i> <i>Option 1: “Building – weak ground – hard ground”</i>			
Математическое ожидание Mathematical expectation	210	700	19,5
Дисперсия Dispersion	4900	3600	40,96
<i>Вариант 2: «Здание – жесткий грунт – слабый грунт»</i> <i>Option 2: “Building – hard ground – weak ground”</i>			
Математическое ожидание Mathematical expectation	700	210	19,5
Дисперсия Dispersion	3600	4900	40,96

мичности для зданий различной жесткости (рис. 3). Для жестких зданий на слабом грунте коэффициент динамичности с вероятностью превышения 0,1 может быть принят равным $\beta_{01} = 2,5$, для зданий средней жесткости $\beta_{01} = 3,0$, для гибких зданий $\beta_{01} = 3,3$.

Исследование влияния мощности верхнего слабого слоя на величину коэффициента динамичности показало следующее. Для жестких зданий ($V_0 = 800$ м/с) увеличение мощности верхнего слабого слоя от 5 до 30 м не приводит к существенному увеличению коэффициента динамичности: $P(\beta > 2,5) < 0,1$. Для зданий средней жесткости ($V_0 = 550$ м/с) коэффициент динамичности увеличивается от 2,5 при $H_1 < 10$ м до 3,1 при $H_1 = 30$ м. Наибольшее значение коэффициента динамичности наблюдается для гибких зданий ($V_0 = 300$ м/с) от 3,0 при $H_1 = 5$ м до 3,7 при $H_1 = 30$ м.

Увеличение мощности нижнего жесткого слоя приводит к увеличению коэффициента динамичности: для жестких зданий от 2,5 до 2,8; для зданий

средней жесткости 2,5 до 3,3; для гибких зданий от 3,0 до 3,9.

2. Система «здание – жесткий грунт – слабый грунт».

Функция относительного коэффициента динамичности:

$$\beta = -0,0224 - 0,0019 \cdot V_0 + 0,0012 \cdot V_1 + 0,0043 \cdot V_2 + 0,0088 \cdot H_1 + 0,0247 \cdot H_2 + 0,0249 \cdot \beta_s.$$

Математическое ожидание $m_\beta = 1,747$, дисперсия $D_\beta = 0,121$, стандарт:

$$\sigma_\beta = \sqrt{D_\beta} = 0,348.$$

При средних значениях детерминированных параметров вероятность превышения нормативного значения коэффициента динамичности составляет:

$$P(\beta > 2,5) = 1 - F(2,5) = 0,015.$$

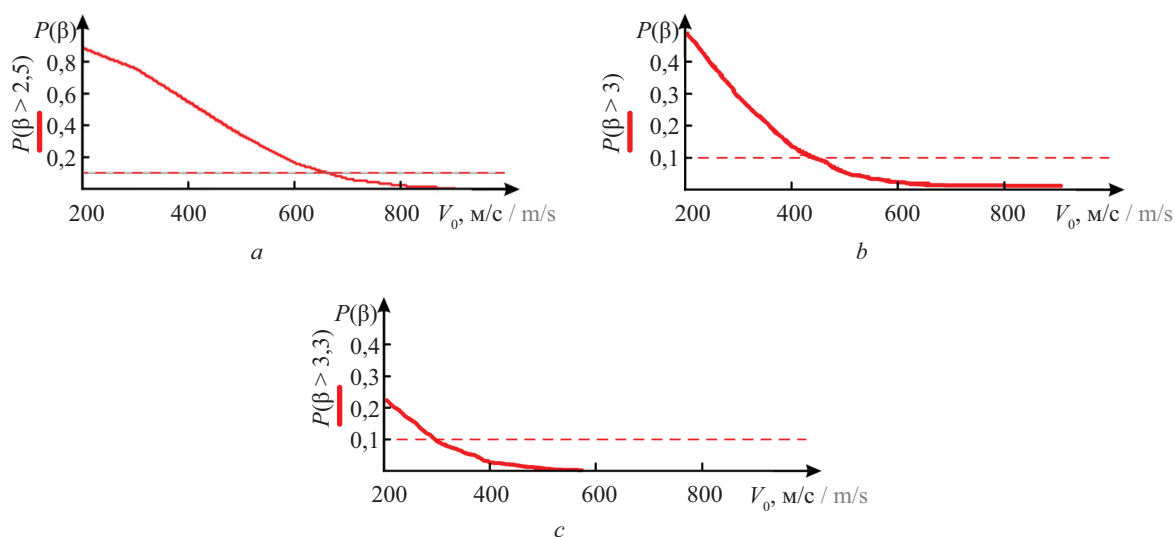


Рис. 3. Вероятности превышения заданного значения коэффициента динамичности для зданий различной жесткости: а — $\beta = 2,5$; б — $\beta = 3,0$; в — $\beta = 3,3$

Fig. 3. Probabilities of exceeding the set value of the dynamism coefficient for buildings of various stiffness: а — $\beta = 2,5$; б — $\beta = 3,0$; в — $\beta = 3,3$

Принимаем вероятность $P(\beta > \beta_{01}) = 0,1$ и находим соответствующее значение коэффициента динамичности для зданий различной жесткости. Для жестких зданий на жестком грунте коэффициент динамичности с вероятностью превышения 0,1 может быть принят равным $\beta_{01} = 2,0$, для зданий средней жесткости $\beta_{01} = 2,5$, для гибких зданий $\beta_{01} = 2,8$.

Для зданий жестких и средней жесткости увеличение мощности верхнего жесткого слоя от 5 до 30 м не приводит к существенному увеличению коэффициента динамичности: $P(\beta > 2,5) < 0,1$. Для гибких зданий при мощности слоя $H_1 = 25\text{--}30$ м коэффициент динамичности равен $\beta_{01} = 2,7$.

Увеличение мощности нижнего слабого слоя для зданий жестких и средней жесткости также не приводит к увеличению коэффициента динамичности до величины 2,5. Для гибких зданий при мощности нижнего слабого слоя $H_2 = 25\text{--}30$ м значение коэффициента динамичности равно $\beta_{01} = 2,9$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена задача оценки надежности системы «здание – многослойное основание» под действием сейсмической нагрузки в зависимости от жесткости здания, а также жесткости, мощности и конфигурации слоев грунтового основания. В качестве критерия надежности системы принят относительный коэффициент динамичности с заданной вероятностью его превышения. Коэффициент динамичности в общей постановке моделируется в виде функции

шести случайных аргументов. Проведена линеаризация функции и получены аналитические зависимости для двух вариантов двухслойного основания с повышенными и пониженными значениями жесткости слоев и различным порядком их чередования.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

Для жестких и средней жесткости зданий, опирающихся на жесткий приповерхностный слой грунта, коэффициенты динамичности с вероятностью 0,1 не превышают нормативное значение $\beta_{\max} = 2,5$, в том числе и при увеличении мощности составляющих слоев H_1 и H_2 до 30 м. Коэффициенты динамичности для гибких зданий превышают нормативное значение на 8–15 %.

Если приповерхностный слой сложен слабым грунтом, то коэффициенты динамичности β_{01} с вероятностью превышения $P(\beta > \beta_{01}) = 0,1$ составляют: для жестких зданий $\beta_{01} = 2,5$, для зданий средней жесткости $\beta_{01} = 3,0$, для гибких зданий $\beta_{01} = 3,3$. Увеличение мощности слоев до 30 м приводит к увеличению коэффициентов динамичности для всех типов зданий. При $H_1 = 30$ м коэффициенты динамичности соответственно равны: $\beta_{01} = 2,6$, $\beta_{01} = 3,1$, $\beta_{01} = 3,7$. При $H_2 = 30$ м — $\beta_{01} = 2,8$, $\beta_{01} = 3,3$, $\beta_{01} = 3,9$.

Принятый в нормах коэффициент динамичности, который для всех типов грунтов не превышает значения 2,5, не может обеспечить требуемый уровень надежности сейсмостойких зданий и должен определяться на основе расчетов с учетом жесткости сооружения и характеристик многослойного основания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бурбрайер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб. : Наука, 1998. 253 с.
2. Тягин А.Г. Учет взаимодействия сооружений с основанием при расчетах на сейсмические воздействия. М. : АСВ, 2014. 135 с.
3. Sivakumar Babu G.L. Reliability and Risk Analysis in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering // Indian Geotechnical Journal. 2024. Vol. 54. Issue 5. Pp. 1705–1737. DOI: 10.1007/s40098-024-00909-6
4. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М. : Машиностроение, 1984. 312 с.
5. Allin C.C. Seismic reliability analysis of structures // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2007. Vol. 36. Issue 13. Pp. 1811–1812. DOI: 10.1002/eqe.732
6. Mackie K.R., Stojadinović B. Performance-based seismic bridge design for damage and loss limit states // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2007. Vol. 36. Issue 13. Pp. 1953–1971. DOI: 10.1002/eqe.699
7. Montiel M.A., Ruiz S.E. Influence of structural capacity uncertainty on seismic reliability of buildings under narrow-band motions // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2007. Vol. 36. Issue 13. Pp. 1915–1934. DOI: 10.1002/eqe.711
8. Lu D.-G., Song P.-Y., Yu X.-H., Wang G.-Y. Global seismic reliability analysis of building structures based on system-level limit states // The 14th World Conference on Earthquake Engineering. 2008.
9. Hofer L., Toska K., Zanini M.A. Impact of epistemic and aleatory uncertainties on the seismic reliability assessment of existing structures // Structures. 2023. Vol. 57. P. 105235. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105235
10. Abdulaziz M.A., Hamood M.J., Fattah M.Y. A review study on seismic behavior of individual and adjacent structures considering the soil — Structure interaction // Structures. 2023. Vol. 52. Pp. 348–369. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.03.186
11. Messaoudi A., Mezouar N., Hadid M., Laouami N. Effects of Soil Heterogeneities on Its Seismic Responses // Lecture Notes in Civil Engineering. 2024. Pp. 221–232. DOI: 10.1007/978-3-031-57357-6_19

12. Berkane H.D., Harichane Z., Guellil M.E., Sadouki A. Investigation of soil layers stochasticity effects on the spatially varying seismic response spectra // *Indian Geotechnical Journal*. 2019. Vol. 49. Issue 2. Pp. 151–160. DOI: 10.1007/s40098-018-0301-y
13. Guellil M.E., Harichane Z., Çelebi A. Comparison Between Non-linear and Stochastic Methods for Dynamic SSI Problems // *Advances in Science, Technology & Innovation*. 2019. Pp. 191–194. DOI: 10.1007/978-3-030-01656-2_43
14. Guellil M.E., Harichane Z., Çelebi E. Seismic codes based equivalent nonlinear and stochastic soil structure interaction analysis // *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2020. Vol. 43. Issue 1. Pp. 1–14. DOI: 10.2478/sgem-2020-0007
15. Guellil M.E., Harichane Z., Berkane H.D., Sadouki A. Soil and structure uncertainty effects on the soil foundation structure dynamic response // *Earthquakes and Structures*. 2017. Vol. 12. Issue 2. Pp. 153–163. DOI: 10.12989/eas.2017.12.2.153
16. Синицын А.П., Медведева Е.С., Хачиян Э.Е. и др. Волновые процессы в конструкциях зданий при сейсмических воздействиях. М.: Наука, 1987. 159 с.
17. Хачиян Э.Е. Сейсмические воздействия и прогноз поведения сооружений. Ереван: Гитутюн, 2015. 555 с.
18. Пишеничкина В.А., Рекунов С.С., Иванов С.Ю. Вероятностный анализ динамических характеристик системы «сооружение – слоистое основание» // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2024. № 8 (788). С. 32–43. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-32-43. EDN XZEYVI.
19. Пишеничкина В.А., Рекунов С.С., Иванов С.Ю., Жиденко А.С., Чанчан М., Хамиси С. Сравнительный анализ результатов расчета системы «здание – основание», представленной в виде слоистой модели // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: строительство и архитектура. 2023. № 1 (90). С. 43–53. EDN ELCFWD.

Поступила в редакцию 27 декабря 2024 г.

Принята в доработанном виде 12 января 2025 г.

Одобрена для публикации 9 апреля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Валерия Александровна Пшеничкина** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, д. 28; SPIN-код: 3399-0668, РИНЦ ID: 653059, Scopus: 57189646401, ResearcherID: ABF-4196-2020, ORCID: 0000-0001-9148-2815; vap_hm@list.ru;

Станислав Юрьевич Иванов — ассистент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, д. 28; SPIN-код: 8611-7473, РИНЦ ID: 1078261, ORCID: 0000-0003-4770-8754; stassuz-1-14@yandex.ru;

Сергей Сергеевич Рекунов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, д. 28; SPIN-код: 7435-7193, РИНЦ ID: 496757, Scopus: 57190969032, ResearcherID: ABB-4080-2020, ORCID: 0000-0002-9360-8239; rekunoff@mail.ru;

Алексей Александрович Чураков — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, д. 28; SPIN-код: 6565-3690, РИНЦ ID: 475651, Scopus: 57214092414, ORCID: 0000-0002-0810-8177; alexei.churakov@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Birbraer A.N. *Seismic analysis of structures*. St. Petersburg, Nauka, 1998; 253. (rus.).
2. Tyapin A.G. *Consideration of soil-structure interaction in seismic calculations*. Moscow, ASV, 2014; 135. (rus.).
3. Sivakumar Babu G.L. Reliability and Risk Analysis in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. *Indian Geotechnical Journal*. 2024; 54(5):1705-1737. DOI: 10.1007/s40098-024-00909-6
4. Bolotin V.V. *Prediction of the service life of machines and structures*. Moscow, Mashinostroenie, 1984; 312. (rus.).
5. Allin C.C. Seismic reliability analysis of structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2007; 36(13):1811-1812. DOI: 10.1002/eqe.732
6. Mackie K.R., Stojadinović B. Performance-based seismic bridge design for damage and loss limit states. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 2007; 36(13):1953-1971. DOI: 10.1002/eqe.699
7. Montiel M.A., Ruiz S.E. Influence of structural capacity uncertainty on seismic reliability of buildings under narrow-band motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2007; 36(13):1915-1934. DOI: 10.1002/eqe.711

8. Lu D.-G., Song P.-Y., Yu X.-H., Wang G.-Y. Global seismic reliability analysis of building structures based on system-level limit states. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. 2008
9. Hofer L., Toska K., Zanini M.A. Impact of epistemic and aleatory uncertainties on the seismic reliability assessment of existing structures. *Structures*. 2023; 57:105235. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105235
10. Abdulaziz M.A., Hamood M.J., Fattah M.Y. A review study on seismic behavior of individual and adjacent structures considering the soil — Structure interaction. *Structures*. 2023; 52:348-369. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.03.186
11. Messaoudi A., Mezouar N., Hadid M., Laouami N. Effects of Soil Heterogeneities on Its Seismic Responses. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024; 221-232. DOI: 10.1007/978-3-031-57357-6_19
12. Berkane H.D., Harichane Z., Guellil M.E., Sadouki A. Investigation of soil layers stochasticity effects on the spatially varying seismic response spectra. *Indian Geotechnical Journal*. 2019; 49(2):151-160. DOI: 10.1007/s40098-018-0301-y
13. Guellil M.E., Harichane Z., Çelebi A. Comparison Between Non-linear and Stochastic Methods for Dynamic SSI Problems. *Advances in Science, Technology & Innovation*. 2019; 191-194. DOI: 10.1007/978-3-030-01656-2_43
14. Guellil M.E., Harichane Z., Çelebi E. Seismic codes based equivalent nonlinear and stochastic soil structure interaction analysis. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2020; 43(1):1-14. DOI: 10.2478/sgem-2020-0007
15. Guellil M.E., Harichane Z., Berkane H.D., Sadouki A. Soil and structure uncertainty effects on the soil foundation structure dynamic response. *Earthquakes and Structures*. 2017; 12(2):153-163. DOI: 10.12989/eas.2017.12.2.153
16. Sinityn A.P., Medvedeva E.S., Khachiyan E.E. et al. *Wave processes in building structures under seismic impacts*. Moscow, Nauka, 1987; 159. (rus.).
17. Khachiyan E.E. *Seismic impacts and prediction of the behavior of structures*. Yerevan, Gitutyun, 2015; 555. (rus.).
18. Pshenichkina V.A., Rekunov S.S., Ivanov S.Yu. Probabilistic analysis of dynamic characteristics of the “structure – layered foundation” system. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024; 8(788):32-43. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-32-43. EDN XZEYVI. (rus.).
19. Pshenichkina V.A., Rekunov S.S., Ivanov S.Yu., Zhidenko A.S., Tchanchane M., Hamici S. Comparative analysis of the calculation results of the building-base system presented in the form of a layered model. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2023; 1(90):43-53. EDN ELCFWD. (rus.).

Received December 27, 2024.

Adopted in revised form on January 12, 2025.

Approved for publication on April 9, 2025.

Bionotes: **Valeria A. Pshenichkina** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Building Structures, Foundations and reliability of structures; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russian Federation; SPIN-code: 3399-0668, ID RSCI: 653059, Scopus: 57189646401, ResearcherID: ABF-4196-2020, ORCID: 0000-0001-9148-2815; vap_hm@list.ru;

Stanislav Yu. Ivanov — assistant of the Department of Building Structures, Foundations and reliability of structures; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russian Federation; SPIN-code: 8611-7473, ID RSCI: 1078261, ORCID: 0000-0003-4770-8754; stassuz-1-14@yandex.ru;

Sergey S. Rekunov — Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Associate Professor of the Department of Structural Mechanics; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russian Federation; SPIN-code: 7435-7193, ID RSCI: 496757, Scopus: 57190969032, ResearcherID: ABB-4080-2020, ORCID: 0000-0002-9360-8239; rekunoff@mail.ru;

Alexey A. Churakov — Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Associate professor of the Department of Building Structures, Foundations and reliability of structures; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russian Federation; SPIN-code: 6565-3690, ID RSCI: 475651, Scopus: 57214092414, ORCID: 0000-0002-0810-8177; alexei.churakov@yandex.ru.

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

Рециклинг вторичного сырья для изготовления мелкоштучных бетонных изделий в дорожном строительстве. Обзор

Владимир Алексеевич Токарев, Максим Дмитриевич Кабалин,
Михаил Сергеевич Грищенко, Марина Алексеевна Высоцкая

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлен обзор современных решений в области рециклинга вторичного сырья для производства мелкоштучных бетонных изделий, применяемых в дорожном строительстве. Рассматриваются актуальные проблемы утилизации отходов, сопутствующих технодеятельности человека, и возможности их повторного использования для снижения экологической нагрузки и экономии ресурсов. Анализируются различные виды вторичного сырья, пригодного для вовлечения в бетонные смеси, такие как отходы строительства и сноса, резина, кирпичная крошка и др.

Материалы и методы. На основе анализа, обобщения и систематизации информации, полученной из открытых отечественных и зарубежных источников, изучен практический опыт применения различного вторичного сырья для нужд транспортно-дорожного комплекса в качестве заполнителя или добавок для мелкоштучных бетонных изделий.

Результаты. Систематизированы данные о свойствах бетонов с использованием вторичного сырья, исследовано влияние различных типов и количества добавок на прочность, морозостойкость, водонепроницаемость и другие характеристики мелкоштучных бетонных изделий. Проанализированы существующие стандарты и нормативные документы, регламентирующие применение переработанных материалов в дорожном строительстве.

Выводы. Обзор демонстрирует значительный потенциал использования вторичного сырья в производстве мелкоштучных бетонных изделий для дорожного строительства. Вовлечение вторичного сырья в технологию производства мелкоштучных изделий позволяет снизить себестоимость продукции, уменьшить объемы отходов, направляемых на захоронение, и способствует сохранению первичных природных ресурсов. Необходимы дальнейшее исследование и разработка оптимальных технологических решений для обеспечения высокого качества и надежности изделий с применением вторичных материалов с учетом специфики климатических условий и требований к долговечности дорожных конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вторичный заполнитель, бетонный лом, строительный мусор, геоника, бетон, устойчивое развитие, мелкоштучные изделия, бордюр, резиновая крошка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Токарев В.А., Кабалин М.Д., Грищенко М.С., Высоцкая М.А. Рециклинг вторичного сырья для изготовления мелкоштучных бетонных изделий в дорожном строительстве. Обзор // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 6. С. 899–919. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.899-919

Автор, ответственный за переписку: Владимир Алексеевич Токарев, tokareva161@mail.ru.

Recycling of secondary raw materials for the manufacture of small-piece concrete products in road construction. Review

Vladimir A. Tokarev, Maksim D. Kabalin, Mihail S. Grishchenko, Marina A. Vysotskaya
*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov);
Belgorod, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. An overview of modern solutions in the field of recycling of secondary raw materials for the production of small-piece concrete products used in road construction is presented. The current problems of waste disposal associated with human activity and the possibility of their reuse to reduce the environmental burden and save resources are considered. Various types of secondary raw materials suitable for use in concrete mixes, such as construction and demolition waste, rubber, brick chips, etc., are analyzed.

Materials and methods. Based on the analysis, generalization and systematization of information obtained from open domestic and foreign sources, the practical experience of using various secondary raw materials for the needs of the transport and road complex as a filler or additives for small-piece concrete products is considered.

Results. The paper systematizes data on the properties of concretes using recycled materials, examines the effect of various types and amounts of additives on strength, frost resistance, water resistance and other characteristics of small-piece

concrete products. The existing standards and regulatory documents regulating the use of recycled materials in road construction are analyzed.

Conclusions. The review demonstrates the significant potential of using recycled materials in the production of small-piece concrete products for road construction. The involvement of secondary raw materials in the production technology of small-piece products makes it possible to reduce the cost of production, reduce the amount of waste sent to burial and contributes to the conservation of primary natural resources. However, further research and development of optimal technological solutions is needed to ensure high quality and reliability of products using recycled materials, taking into account the specifics of climatic conditions and requirements for durability of road structures.

KEYWORDS: secondary aggregate, concrete scrap, construction debris, geonics, concrete, sustainable development, small-piece products, curb, rubber chips

FOR CITATION: Tokarev V.A., Kabalin M.D., Grishchenko M.S., Vysotskaya M.A. Recycling of secondary raw materials for the manufacture of small-piece concrete products in road construction. Review. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(6):899-919. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.899-919 (rus.).

Corresponding author: Vladimir A. Tokarev, tokareva161@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Рост численности населения, быстрые темпы урбанизации и истощение природных ресурсов интенсивно усугубляют экологические проблемы планеты. По разным данным в России за год образуется до 100 млн т отходов промышленного производства. При этом на сегодняшний день более 50 % строительных отходов и отходов демонтажа складированы на свалках. Для наглядности рассматриваемой проблематики на рис. 1 показана площадь свалок в России в сравнении с размерами целых государств.

Материалы, содержащиеся на свалках, в основной своей массе являются инертными и характеризуются отсутствием опасных свойств, поэтому могут быть вовлечены в производство строительной продукции и, в частности, для производства работ в дорожном строительстве. Доля образующихся промышленных отходов представлена на рис. 2.

Строительная отрасль — один из ведущих секторов, обостряющих экологические проблемы планеты. В настоящее время любое строительство сложно представить без бетонных изделий. Бетон — это базовый строительный материал, использующийся практически во всех конструкциях: от автомобильных дорог до зданий, железных дорог и мостов. И, по мнению авторов работы [2], бетон считается вторым наиболее потребляемым веществом на Земле после воды. Однако широкое распространение бетона, например в Европе более 750 млн м³ бетона производится ежегодно, что составляет около 4 т бетона на душу населения, влечет за собой ряд негативных последствий [2]. Рекомендации Международного энергетического агентства (МЭА) включают повышение энергоэффективности и использование альтернативных материалов, топлива или сырья в качестве основных средств снижения воздействия бетонных изделий на окружающую

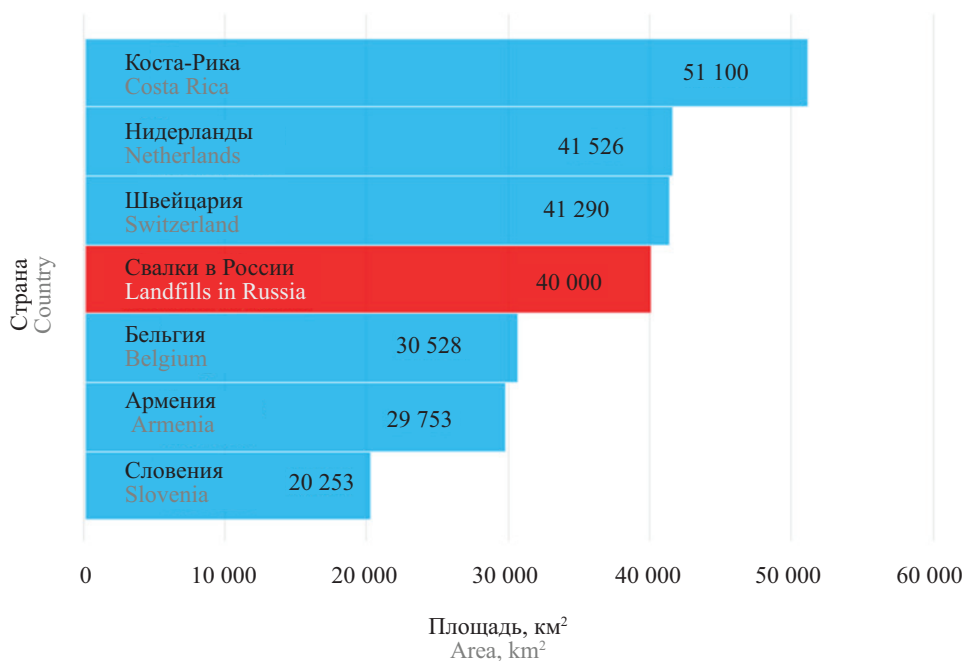


Рис. 1. Площадь свалок в РФ в сравнении с размерами государств

Fig. 1. The area of landfills in the Russian Federation in comparison with the size of states

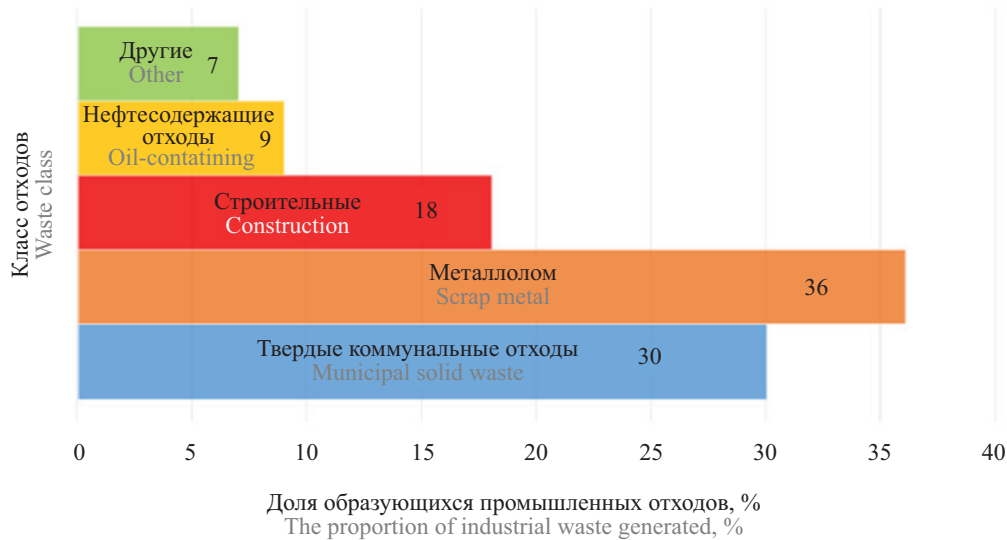


Рис. 2. Отходы промышленности [1]

Fig. 2. Industrial waste [1]

среду. Хотя сам бетон, как готовый материал, не оказывает значимого воздействия на окружающую среду, анализ его жизненного цикла демонстрирует, что производство бетонных компонентов и изделий сопровождается рядом экологических проблем, представленных на рис. 3.

Ежегодное мировое производство цемента составляет порядка 3 млрд т [3], ожидается, что в будущем объем производства будет увеличиваться. При этом производство 1 т клинкера сопровожда-

ется выбросом в окружающую среду до 850 кг CO₂, а также от 1,5 до 9,5 кг оксидов азота и от 0,3 до 1,0 кг твердых частиц с дымовыми газами. Хотя принято считать, что большая часть цементной пыли улавливается фильтрами и вновь направляется в печь [4].

Исследования показывают, что только цементная промышленность ответственна за 7 % мировых выбросов CO₂ [5], являющихся основной причиной глобального потепления. Строительный сектор рас-

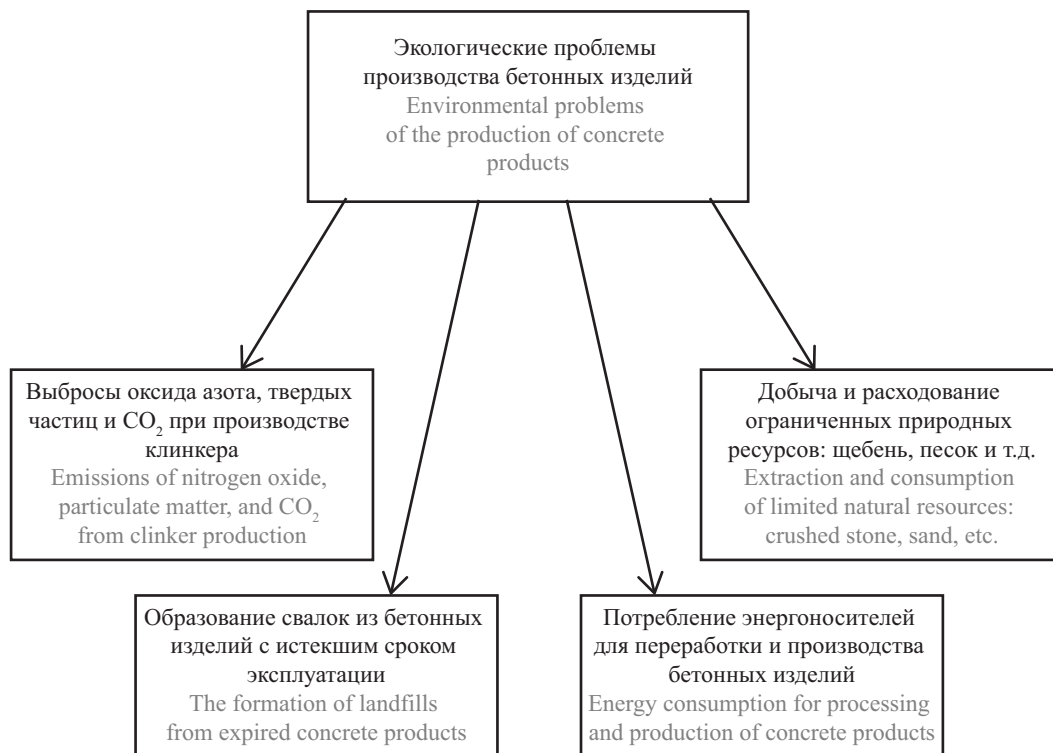


Рис. 3. Экологические проблемы производства бетонных изделий

Fig. 3. Environmental problems of the production of concrete products

полагает самым большим экономически эффективным потенциалом для снижения выбросов парниковых газов [6]. Ввиду значительного потребления бетона даже небольшое сокращение выбросов парниковых газов на тонну его производства может существенно снизить экологическую нагрузку на экосистемы.

Сегодня застройщик имеет широкий выбор в номенклатуре строительных материалов. Однако большинство из них практически ничем не отличаются от вековых аналогов, за исключением высокотехнологичных композитов [7]. Причина этого кроется в стабильном подходе к их производству с акцентом на инженерно-технические требования. Реализация теоретических положений геоники (геомиметики) и системный подход к регулированию вопросов жизнеустройства помогают создавать комфортную среду для проживания человека. Основу геоники составляет ряд принципов: поиск оптимальных решений; экономия сырья и поиск нового; максимальная экологичность; энергосбережение; гармоничное сочетание конструкций и природы; создание благоприятной среды для жизни человека, гармонично сочетающей производимую им социальную и инженерную инфраструктуру; природное равновесие. Ввиду растущего интереса к устойчивому развитию, различных стимулов и льгот от государства ключевые игроки строительной отрасли как никогда ранее заинтересованы в использовании экологичных материалов с минимальным воздействием на окружающую среду. Следовательно, повышение экологической осведомленности производителей и разработка новых проектов, нацеленных на уменьшение выбросов, могут привести к глобальным позитивным улучшениям в строительной отрасли [8, 9].

Первостепенная экологическая проблема, связанная с бетонной промышленностью, — правильная утилизация строительных материалов [10]. При этом замещение заполнителей играет ключевую роль для экологического развития бетонной отрасли, поскольку они составляют от 80 до 85 % типичной бетонной смеси. Их добыча влечет агрессивное потребление местных природных ресурсов. Песок и гравий — базовые ресурсы, добываемые для производства нерудных материалов и продаваемые в больших объемах, что приводит к эрозии дельт рек, береговой линии и формированию значительных по своей масштабности выработок. Использование заменителей и альтернативных материалов является эффективным средством предотвращения или уменьшения ущерба природным экосистемам [11, 12].

Интенсивность влияния альтернативных материалов определяется масштабами строительной отрасли. Экономика строительства зданий в последние годы демонстрирует восстановление после окончания общемирового локдауна, что сопряже-

но с увеличением производства бетонных изделий в мире. В соответствии с концепцией экономики замкнутого цикла интеграция альтернативных материалов в производство помогает как экономить природные ресурсы, так и сокращать объемы промышленных свалок за счет включения городских и промышленных отходов в бетон. Оценка экологических преимуществ, получаемых от использования переработанных материалов в рядовых строительных элементах, обычно проводится посредством оценки жизненного цикла с точки зрения первичной энергии, затраченной на производство, и выбросов парниковых газов [13]. Включение альтернативного и экологически чистого сырья из вторичного сырья — будущая задача бетонной промышленности [14, 15]. Однако уже сейчас часть мелких и крупных заполнителей в бетоне может быть заменена переработанными материалами, но эта стратегия ограничена техническими проблемами и национальными регулирующими документами [16, 17]. Также использование продуктов рециклинга бетонных изделий сопровождается спецификой воздействия на характеристики производимого товарного бетона [18]. Отличительной особенностью щебня из дробленного бетона служит наличие цементного раствора, налипшего на зерна первоначального щебня [19]. Вопрос количественного содержания этого компонента в различных фракциях щебня из бетонного лома имеет существенное значение для прогнозирования поведения заполнителя в бетонной смеси [20]. Цементный раствор также может быть вторично использован как вяжущее после его активации [21].

Отслужившие свой срок шины — еще один вид отходов, с которым становится все труднее справляться во многих странах. Утилизация отработанных резиновых шин привлекает внимание исследователей, изучающих мировые экологические проблемы. Миллионы шин ежегодно выбрасываются или зарываются, что представляет значительную угрозу для окружающей среды. Было подсчитано, что каждый год почти 1000 млн шин заканчивают свой срок службы, из них более 50 % выбрасываются на мусорные свалки без какой-либо обработки [22]. Прогнозируется, что к 2030 г. будет выброшено 5000 млн шин [23]. Выполненные пилотные разработки [24] демонстрируют, что заполнители, полученные из шин, имеют потенциал для применения в бетоне. Выявлено, что использование шин обладает рядом особенностей, таких как снижение прочности на сжатие и растяжение, при этом пластичность, способность к деформации и прогибу улучшаются. Совокупность указанных свойств может быть полезна и желательна при использовании бетона для изготовления бордюров [25–27]. Данный заполнитель может применяться в количестве до 25 % по объему для бетона в различных областях [28].



Рис. 4. Виды мелкоштучных бетонных изделий

Fig. 4. Types of small-piece concrete products

Бой кирпича — востребованное техногенное сырье, получаемое в результате демонтажа стен, фундаментов зданий и ограждений, а также из некондиционного кирпича. Благодаря своему минералогическому составу бой кирпича находит широкое применение в строительной индустрии. Молотый кирпичный бой можно рассматривать как аналог природных тонкомолотых минеральных веществ, используемых в качестве пуццолановых добавок в цементных вяжущих [29].

Все описанные выше отходы, которые по сути являются вторичным сырьем, — это часть промышленных свалок. Отходы, содержащиеся на свалках, подразделяются на твердые и жидкие, некоторые из них поддаются переработке, другие нуждаются в обезвреживании и захоронении. Твердые промышленные отходы классифицируются на металлические, неметаллические и комбинированные. Неметаллические бывают химически инертными или химически активными. К первым можно отнести породу, бетон и камень, золу; ко вторым — пластмассы, полиэтилен, резину. Комбинированные представлены разнообразным производственным и строительным мусором, нуждающимся в сортировке.

Таким образом, рассмотрены основные источники вторичного сырья, формирующие строительные свалки. Как видно, ассортимент и объемы вторичного сырья, перспективного с позиции вовлечения в технологию изготовления бетонных изделий, впечатляют. И если в части применения такого бетона для ответственных объектов и изделий есть ряд вопросов, подлежащих проработке, то целесообразность и необходимость вовлечения переработанного вторичного сырья в производство мелкоштучных бетонных изделий для дорожной отрасли однозначна.

Мелкоштучные бетонные изделия — это отдельные элементы из бетона, используемые для строительства, благоустройства, декоративных целей. Виды мелкоштучных бетонных изделий приведены на рис. 4.

Отличительная черта таких изделий — небольшие размеры, что делает их удобными для транспортировки, укладки и монтажа. Перспективность использования переработанных материалов в производстве мелкоштучных бетонных изделий обусловлена тем, что требования к их техническим характеристикам ниже.

В настоящем обзоре анализируются физические, механические и экологические характеристики как мелких, так и крупных заполнителей, применяемых в производстве мелкоштучных бетонных изделий для дорожного строительства. Цель исследования заключается в сборе и обобщении практического опыта применения переработанных материалов и оценке влияния степени замены кондиционного сырья на характеристики конечного материала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выполнена аналитическая оценка отечественных и зарубежных научных источников, посвященных теме применения сырья, образующегося в процессе рециклинга, с целью производства мелкоштучных бетонных изделий для дорожного строительства. Изучен иностранный опыт по получению мелкоштучных изделий из бетонного лома. Показаны общие тенденции и различия в подходах для решения данной проблематики. Основными источниками библиометрических исследований выступили такие ресурсы, как отечественная библиотека eLibrary и зарубежные Scopus и Google Scholar. Платформы выбраны как три наиболее рас-

пространенных и обширных онлайн-источника, позволяющих получать сквозные данные и результаты по различным отраслям знаний. Обзор сосредоточен на работах, опубликованных в диапазоне последних 10 лет. Первым этапом исследования стал предварительный отбор статей и рецензий на исходные материалы. Далее были установлены более узкие основные категории поисковых запросов, после чего осуществлен вторичный поиск статей и исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ публикаций продемонстрировал, что значительный интерес к вопросам рециклинга бетонных изделий с целью повторного применения в составе мелкоштучных изделий проявляют зарубежные исследовательские группы. Объем публикаций, затрагивающий эту проблематику в отечественных и зарубежных работах, несопоставим. Публикации российских авторов носят главным образом теоретический характер, но есть и практический опыт. Так, в исследовании [30], выполненном в лаборатории на базе Хакасского технического института — филиала Сибирского федерального университета — был изготовлен бордюрный камень из переработанного бетона. Физико-механические свойства испытуемого вторичного щебня представлены в табл. 1.

На основе данного вторичного щебня, который использовался в качестве крупного заполнителя, полученного из рядового бетона и бетона повышенной прочности (фракции 5–40 мм), изготовлены 4 бетонных образца. В качестве мелкого заполнителя применялся карьерный песок с модулем крупности 2,2, в качестве вяжущего вещества — цемент марки М400 Красноярского цементного завода. Изготовленные образцы бордюрного камня испытаны на сжатие.

Результаты испытаний показали, что прочность на сжатие образцов с заполнителем из бетонного лома различной прочности практически не отличается. Однако образцы с заполнителем из рядового

бетона более прочные на изгиб, чем образцы с заполнителем из более прочного бетонного лома. Результаты могут свидетельствовать, что прочность исходного бетона, из которого получен вторичный щебень, не оказывает существенного влияния на прочность производимого бетона. Исследование также продемонстрировало, что прочность бетона повышается за счет прочного сцепления между цементным камнем и заполнителем. Тонкопористое строение зерен цемента и раствора, присутствующих в заполнителе из бетонного лома, также способствует формированию структуры и увеличению прочности бетона. Образцы, изготовленные из жесткой смеси, показали более высокую прочность, чем образцы из подвижной смеси. Пониженная прочность образцов с заполнителем из бетонного лома может быть связана с наличием остатков цемента и раствора на зернах вторичного щебня, которые становятся более пористыми после механической деструкции при дроблении. Это приводит к повышенному водопоглощению щебня (6–8 %), что, в свою очередь, повышает адгезию вторичного заполнителя с другими компонентами, уплотняет структуру бетона и улучшает сцепление цементного камня с заполнителем [31]. Таким образом, вторичный заполнитель оказывает влияние как на структуру цементного камня, так и на контактную зону между цементным камнем и заполнителем. Далее методом вибролитья также была изготовлена тротуарная плитка.

Данные исследования позволяют сделать вывод о том, что бетонная смесь с щебнем из бетонного лома может быть успешно использована в различных строительных проектах, таких как изготовление бордюрных камней и тротуарных плиток. Применение бетонного лома в качестве заполнителя — рациональное решение, соответствующее принципам устойчивого развития экосистемы. Использование бетонного лома в строительстве — экологически ответственный и экономически эффективный подход.

В бетоне, используемом для получения бортового камня, также было предложено [32] заменить

Табл. 1. Физико-механические свойства вторичного щебня [30]

Table 1. Physical and mechanical properties of secondary crushed stone [30]

Характеристики Characteristic	Результат испытаний Test Result
Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	2150–2450
Фактор дробимости, % Fragmentation, %	0,7–0,79
Влажность, % Humidity content, %	3–6
Водопоглощение, % Water absorption, %	4–5
Потери при прокаливании, % Calcination losses, %	5

50 % природного заполнителя на бетонный лом, поставляемый Мадридским заводом по переработке отходов. Цемент, применяемый в исследовании, содержал 25 % тонкомолотых продуктов, полученных при сносе зданий. Керамические побочные продукты, прошедшие активационную термическую обработку, — идеальные компоненты для повторного использования в качестве пуццолановых добавок, без необходимости дополнительных энергозатрат.

Блоки, бордюры и брусчатка широко используются на территории Пиренейского полуострова, в первую очередь, для пешеходных дорожек. При их изготовлении контрольные образцы сравнивались с бетонными блоками, изготовленными из смешанного переработанного заполнителя и «экологически эффективного» цемента, содержащего компоненты, полученные при сносе зданий. Характеристики вторичного заполнителя представлены в табл. 2. Сравнительный анализ с требованиями государственных стандартов Испании^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8} демонстрирует отклонение только по показателю водопоглощения.

Далее были изготовлены контрольный образец смеси и изделия с использованием переработанных материалов. После чего выполнены испытания: прочность бетона на сжатие, прочность бордюра на изгиб, прочность брусчатки на растяжение при раскалывании. Полученные данные приведены в табл. 3. Изделия соответствовали размерным требованиям для тротуарных блоков и бордюров, изложенным в соответствующих европейских стан-

дартах^{9, 10}. Ни в одном из изделий не наблюдалось трещин или шелушения поверхности независимо от материала, использованного при их изготовлении. Существенных различий в текстуре между образцами не выявлено. Однако легко обнаруживались различия в цвете, поскольку элементы, изготовленные из переработанных материалов, имели красноватый оттенок, связанный с цветом кирпичной пыли, использованной для производства цемента.

Цемент с добавлением переработанных материалов не смог компенсировать недостатки бетона с использованием вторичного щебня. Его водопоглощение так и осталось повышенным. В свою очередь, пуццолановые свойства и большая удельная поверхность «экологически эффективного» цемента по сравнению с обычным цементом являются положительными факторами, способствующими механической прочности смеси. Представленные результаты [33] подтверждают преимущества кирпичного порошка в качестве частичной замены цемента для регулирования прочности бетона на сжатие. Другие исследователи [34, 35] в свете неблагоприятных эффектов, наблюдаемых при высоких коэффициентах замены первичного заполнителя вторичным, предлагают ограничения в содержании добавки от 15 до 30 %. Утверждается [36], что прочность на сжатие снижается с ростом коэффициентов замены, когда удельная поверхность используемого кирпичного порошка аналогична или ниже, чем у цемента. Механическая прочность на ранней стадии была ниже в бетоне с использованием вторичного заполнителя. Прочность на изгиб ниже, чем у контрольного образца на 26 %, а прочность на растяжение при раскалывании по сравнению с обычными бордюрами и брусчаткой ниже на 12,8 %.

Две наиболее распространенные причины преждевременного разрушения бордюра, как указано в статье [37]: экспансивные почвы и неконтролируемый рост корней деревьев. Во время цикла усадки-набухания экспансивные почвы изменяют объем и оказывают дифференциальное давление на нижнюю часть бордюра [38]. Наличие близлежащих деревьев и местные дренажные условия также влияют на движение грунта [39]. Деревья и кустарники, прилегающие к бордюру, извлекают воду со значительной глубины, пускают корни в осевом и радиальном направлениях и увеличивают потенциал движения бордюра [40]. Диапазон давления, оказываемого корнями деревьев, может составлять от 0,05 до 6 МПа [41, 42], а в исследовании [43] показано, что напряжение, создаваемое в бетонных секциях, может превышать 50 МПа.

¹ CEN. EN 197-1. Cement — Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. CEN : Belgium, Brussels, 2011.

² CEN. EN 12620+A1. Aggregates for Concrete. CEN : Belgium, Brussels, 2008.

³ CEN. EN 933-1. Tests for geometrical properties of aggregates — Part 1: Determination of particle size distribution — Sieving method. CEN : Belgium, Brussels, 2012.

⁴ UNE 146406. Determination of Content, Maximum Size and Thick Aggregate Granulometric Modulus in Fresh Concrete. AENOR : Madrid, Spain, 2018.

⁵ UNE 146121. Aggregates for concrete. Specifications for aggregates for concrete for structural concrete elements. AENOR : Madrid, Spain, 2000.

⁶ CEN. EN 1097-6. Tests for mechanical and physical properties of aggregates — Part 6: Determination of particle density and water absorption. CEN : Belgium, Brussels, 2013.

⁷ CEN. EN 933-3. Tests for geometrical properties of aggregates — Part 3: Determination of particle shape — Flakiness index. CEN : Belgium, Brussels, 2012.

⁸ CEN. EN 1097-2. Tests for mechanical and physical properties of aggregates — Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation. CEN : Belgium, Brussels, 2010.

⁹ CEN. EN 1338. Concrete paving blocks — Requirements and test methods. CEN : Madrid, Spain, 2003.

¹⁰ CEN. EN 1338/AC. Concrete paving blocks — Requirements and test methods. CEN : Madrid, Spain, 2006.

Табл. 2. Характеристики вторичного заполнителя [32]

Table 2. Characteristics of secondary aggregate [32]

Характеристики Characteristic	Результат испытаний Test result	Государственный стандарт Standart
Максимальный размер частиц, мм Maximum particle size, mm	20	–
Минимальный размер частиц, мм Minimum particle size, mm	4	4
Соотношения D_{20}/D_4 D_{20}/D_4 ratio	5,0	$\geq 1,4$
Гранулометрический модуль Granulometric modulus	7,67	–
D_4 , % Oversize particle content sieve D_4 , %	5,03	< 10
D_{40} , % Oversize particle content sieve D_{40} , %	0	0
D_{20} , % Oversize particle content sieve D_{20} , %	2,21	< 10
Содержание мелких фракций, % Fines content, %	0,04	≤ 1
Насыпная плотность, мг/м ³ Apparent density, mg/m ³	2,53	–
Водопоглощение, % Water absorption, %	8,53	≤ 7
Лещадность, % Flakiness index, %	14,75	≤ 35
Метод Лос-Анджелеса, % Los Angeles coefficient, %	40,99	≤ 50

Табл. 3. Сравнение прочности контрольного образца и изделий с использованием переработанных материалов [32]

Table 3. Comparison of the strength of the control specimen and products using recycled materials [32]

Свойство Property	Возраст, дни Age	Контрольный образец Control specimen	Бетон с использованием переработанных материалов Concrete using recycled materials
Прочность на сжатие, МПа Compressive strength, MPa	7	24,3 ± 0,2	19,7 ± 1,0
	21	30,4 ± 0,3	26,9 ± 0,6
	28	35,0 ± 0,7	37,1 ± 1,4
Прочность бордюра на изгиб, МПа Kerb flexural strength, MPa	28	5,0 ± 0,12	3,7 ± 0,38
Прочность брусчатки на растяжение при раскалывании, МПа Paving block splitting tensile strength, MPa	28	3,9 ± 0,54	3,4 ± 0,28

С целью определения устойчивости бортового камня к движению почвы и неконтролируемому росту корней деревьев исследователями [44] выбрано пять составов смесей, на основе которых производились бортовые камни. Для того чтобы понять влияние переработанных материалов на свойства бетонных изделий в дополнение к контрольному образцу были использованы составы с добавлением вторичного щебня, переработанных шин и полипропиленового волокна. Состав смесей показан в табл. 4.

По результатам испытаний на прочность при монотонной и циклической нагрузках, а также на трехточечный изгиб, места приложения датчиков представлены на рис. 5, получены данные, указанные в табл. 5 [44].

Очевидно, что плотность бетона с вторичным заполнителем из бетонного лома оказалась ниже, чем у контрольного образца бетонной смеси. Водопоглощение бетона с использованием бетонного лома выше, чем у контрольного образца, что может сократить срок службы бордюра. Полипропилено-

Табл. 4. Состав бетонных смесей [44]

Table 4. The composition of concrete mixtures [44]

Состав смесей Composition of mixtures	Контрольный образец Control specimen	Номер смеси Mix number			
		2	3	4	5
Вода Water	173	173	160	174	166
Цемент Cement	225	225	236,25	262,5	285
Зола Fly ash	75	75	78,75	87,5	95
Природный щебень NA	850	850	–	807,5	–
Вторичный щебень RCA	–	–	784	–	744,6
Переработанные шины TDA	–	–	–	20	20
Мелкий заполнитель FA	900	900	900	900	900
Пластификатор, % Superplasticizer	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Полипропиленовое волокно PPF	0	6	6	6	6

вое волокно незначительно увеличило прочность бордюра на изгиб, что свидетельствует о его незначительном вкладе в максимальную несущую способность. Включение полипропиленового волокна существенно увеличило вязкость разрушения. Бордюры, при изготовлении которых использовалось полипропиленовое волокно, могли выдерживать значительную нагрузку в фазе после пиковой нагрузки, а также показали увеличение устойчивости к смещению и поглотили большое количество энергии трещин на стадии после пика. Это свойство бетона для бордюров может быть ценным при проектировании из-

делия на расширяющейся почве или в месте неконтролируемого роста корней деревьев.

Исследования [45, 46] показывают, что бордюры могут быть изготовлены с заменой до 50 % природного заполнителя на бетонный лом. Это обусловлено тем, что на поверхности вторичного заполнителя сохраняется строительный раствор, который может сделать его более пористым, снизить удельный вес, увеличить водопоглощение и потери при испытаниях на истирание и в целом снизить долговечность [47, 48]. С другой стороны, более грубая и неровная поверхность бетонного лома

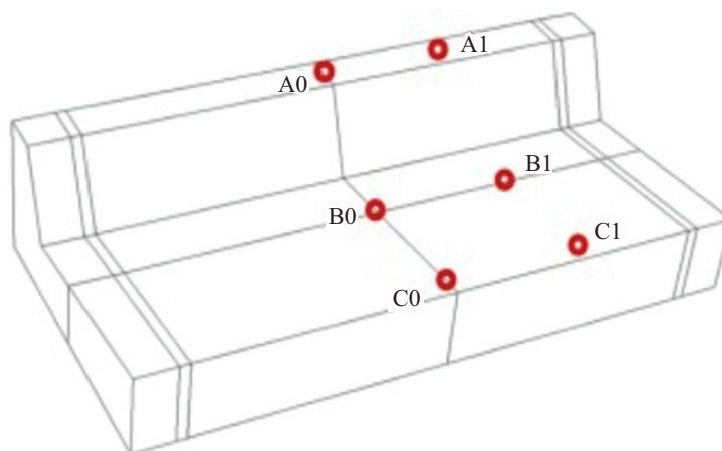


Рис. 5. Места разложения датчиков [44]

Fig. 5. Sensor decomposition sites [44]

Табл. 5. Нагрузочные и деформационные свойства образцов бордюра [44]

Table 5. Load and strain properties of the kerb specimens [44]

Номер смеси Mix number	Пиковая нагрузка, кН Peak load, kN	Остаточная нагрузка, кН Residual load, kN		Максимальная деформация, мкм/м Maximum Strain, $\mu\text{m/m}$			Прочность, Н/мм Toughness, N/mm
		пиковая peak	минимальная minimum	A	B	C	
1	37,65	–	–	97,43	5117,60	114,13	0,46
2	36,69	18,95	17,81	95,58	76,04	121,68	1,89
3	32,32	19,74	15,87	133,18	95,56	150,06	1,75
4	33,29	17,94	16,84	18 498,00	46,91	211,21	1,82
5	30,21	18,69	15,22	11 039,00	7767,90	147,40	1,82

способствует улучшению адгезии с цементом [49]. Авторами исследования [50] были изготовлены бетонные смеси с включением в них вторичных заполнителей, впоследствии используемые для производства бордюров. Состав смесей показан в табл. 6.

Результаты испытаний на осадку конуса, плотность, прочность на сжатие, растяжение и изгиб представлены в табл. 7 [50].

Как видно, вовлечение указанного количества полипропиленового волокна в состав бетонной сме-

Табл. 6. Состав бетонных смесей [50]

Table 6. The composition of concrete mixtures [50]

Номер Mix number	Вода Water	Цемент Cement	Зола Fly ash	Природный щебень NA	Вторичный щебень RCA	Переработанные шины TDA	Мелкий заполнитель FA	Пластификатор, % Superplasticizer, %	Полипропиленовое волокно PPF
<i>Природный щебень и переработанные шины NA and TDA</i>									
1.1	173	225	75	850	–	–	900	0,45	–
1.2	174	262,5	87,5	807,5	–	20	900	0,45	–
1.3	178	300	100	765	–	39	900	0,45	–
1.4	175	322,5	107,5	722,5	–	59	900	0,45	–
1.5	180	345	115	680	–	79	900	0,45	–
<i>Вторичный щебень и переработанные шины RCA and TDA</i>									
2.1	160	236,25	78,75	–	784	–	900	0,45	–
2.2	166	285	95	–	744,6	20	900	0,45	–
2.3	178	330	110	–	705,5	39	900	0,45	–
2.4	177	352,5	117,5	–	666,4	59	900	0,45	–
2.5	179	375	125	–	627,2	79	900	0,45	–
<i>Природный щебень и полипропиленовое волокно NA and PPF</i>									
3.1	173	225	75	850	–	–	900	0,45	0
3.2	173	225	75	850	–	–	900	0,45	2
3.3	173	225	75	850	–	–	900	0,45	4
3.4	173	225	75	850	–	–	900	0,45	6
<i>Вторичный щебень и полипропиленовое волокно RCA and PPF</i>									
4.1	160	236,25	78,75	–	784	–	900	0,45	0
4.2	160	236,25	78,75	–	784	–	900	0,45	2
4.3	160	236,25	78,75	–	784	–	900	0,45	4
4.4	160	236,25	78,75	–	784	–	900	0,45	6

Окончание табл. 6 / End of the Table 6

Номер Mix number	Вода Water	Цемент Cement	Зола Fly ash	Природный щебень NA	Вторичный щебень RCA	Переработанные шины TDA	Мелкий заполнитель FA	Пластификатор, % Superplasticizer, %	Полипропиленовое волокно PPF
<i>Природный щебень, переработанные шины и полипропиленовое волокно NA, TDA and PPF</i>									
5.1	174	262,5	87,5	807,5	–	20	900	0,45	0
5.2	174	262,5	87,5	807,5	–	20	900	0,45	2
5.3	174	262,5	87,5	807,5	–	20	900	0,45	4
5.4	174	262,5	87,5	807,5	–	20	900	0,45	6
<i>Вторичный щебень, переработанные шины и полипропиленовое волокно RCA, TDA and PPF</i>									
6.1	166	285	95	–	744,6	20	900	0,45	0
6.2	166	285	95	–	744,6	20	900	0,45	2
6.3	166	285	95	–	744,6	20	900	0,45	4
6.4	166	285	95	–	744,6	20	900	0,45	6

Табл. 7. Свойства бетонных смесей [50]

Table 7. Properties of concrete mixtures [50]

Номер Mix number	Осадка конуса, мм Slump, mm	Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	Прочность на сжатие, МПа Compressive strength, MPa			Прочность на растяжение, МПа Split Tensile Strength, MPa	Прочность на изгиб, МПа Flexural Strength, MPa
			7 дней 7 days	28 дней 28 days	90 дней 90 days		
<i>Природный щебень и переработанные шины NA and TDA</i>							
1.1	80	2283,49	18,00	25,93	32,96	2,95	4,83
1.2	95	2265,05	22,48	27,85	36,83	2,94	4,82
1.3	95	2235,28	22,38	25,23	36,79	3,07	5,14
1.4	85	2230,51	22,73	27,68	37,23	2,94	5,60
1.5	80	2205,77	19,76	27,33	31,48	2,89	5,99
<i>Вторичный щебень и переработанные шины RCA and TDA</i>							
2.1	80	2238,39	17,01	26,55	33,30	2,53	4,11
2.2	80	2210,87	23,86	28,15	34,13	2,52	4,35
2.3	90	2209,53	21,62	28,51	35,86	2,94	4,61
2.4	85	2202,39	21,82	27,72	32,82	2,74	4,78
2.5	80	2167,61	19,91	28,12	31,11	2,66	4,65
<i>Природный щебень и полипропиленовое волокно NA and PPF</i>							
3.1	80	2283,49	18,00	25,93	32,96	2,95	4,83
3.2	75	2268,46	18,38	26,80	33,06	2,57	4,19
3.3	70	2267,72	19,32	26,89	35,22	2,55	4,37
3.4	65	2265,91	19,39	27,13	35,23	2,48	5,13
<i>Вторичный щебень и полипропиленовое волокно RCA and PPF</i>							
4.1	80	2238,39	17,01	26,55	33,30	2,53	4,11
4.2	77	2228,03	19,51	26,55	33,61	2,52	3,91
4.3	73	2219,67	19,55	26,56	35,02	2,48	4,03
4.4	65	2220,84	19,58	27,92	35,23	2,45	3,68

Номер Mix number	Осадка конуса, мм Slump, mm	Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	Прочность на сжатие, МПа Compressive strength, MPa			Прочность на растяжение, МПа Split Tensile Strength, MPa	Прочность на изгиб, МПа Flexural Strength, MPa
			7 дней 7 days	28 дней 28 days	90 дней 90 days		
<i>Природный щебень, переработанные шины и полипропиленовое волокно NA, TDA and PPF</i>							
5.1	95	2265,05	22,48	27,85	36,83	2,94	4,82
5.2	90	2254,00	22,50	28,18	36,91	2,91	3,84
5.3	85	2250,13	22,51	28,38	36,93	2,74	4,83
5.4	80	2242,28	22,67	29,55	36,98	2,55	4,80
<i>Вторичный щебень, переработанные шины и полипропиленовое волокно RCA, TDA and PPF</i>							
6.1	80	2210,87	23,86	28,15	34,13	2,52	4,35
6.2	78	2208,01	23,89	29,26	34,27	2,51	3,90
6.3	74	2206,06	23,95	30,02	34,58	2,47	4,19
6.4	65	2203,82	23,97	30,54	35,13	2,44	4,59

си не оказало существенного влияния на прочность при сжатии ни в одной из серий бетонных смесей. Несмотря на то, что при более высоком содержании волокон в ряде серий смесей можно было наблюдать небольшое увеличение прочности при сжатии, четкая тенденция отсутствует. Также следует отметить, что все образцы соответствуют необходимой прочности для данной марки бетона. Незначительное снижение прочности на растяжение при добавлении в бетон полипропиленового волокна может быть связано со слипанием волокон или неправильной ориентацией в плоскости разрушения. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о целесообразности использования данных составов бетона для производства бордюров.

За последние годы проведено множество исследований, в которых переработанные шины предложено применять в качестве заполнителя в бетонных и даже гипсовых композитах [51]. Существуют публикации, в которых отслужившие свой срок шины используются совместно с другими переработан-

ными заполнителями, например бетонными [52, 53] или стеклом [54, 55], а также самостоятельно [56, 57].

Для изучения влияния включения переработанных автомобильных шин в состав бетонной смеси авторами труда [56] использовались различные образцы вторичного материала. Смесь № 1, для которой резина нарезалась до 3 мм, смесь № 2 — резина измельчалась до 0,5 мм и смесь № 3 — резина измельчалась до 0,3 мм. Исходная резина без какой-либо обработки или загрязняющих веществ получалась с завода по переработке автомобильных шин, расположенного в Бирмингеме. Также для смеси № 4 применялся вторичный материал, получаемый посредством смешивания трех фракций вручную. Контрольный образец бетона в анализируемой статье примерно соответствовал отечественному классу бетона по прочности В50. Замена мелкого заполнителя резиной составила порядка 20 %. Состав бетонных смесей приведен в табл. 8.

Прочность образцов бетона на сжатие на 28-й день проверена в соответствии с требованиями на-

Табл. 8. Состав бетонных смесей [56]

Table 8. The composition of concrete mixtures [56]

Состав смесей Composition of mixtures	Контрольный образец Control specimen	Номер смеси Mix number			
		1	2	3	4
Вода Water	234	232	230	230	232
Цемент Cement	632	627	621	621	627
Песок Sand	519	416	410	410	414
Природный щебень NA	1013	1005	996	996	1002
Переработанные шины TDA	–	46	37	37	40

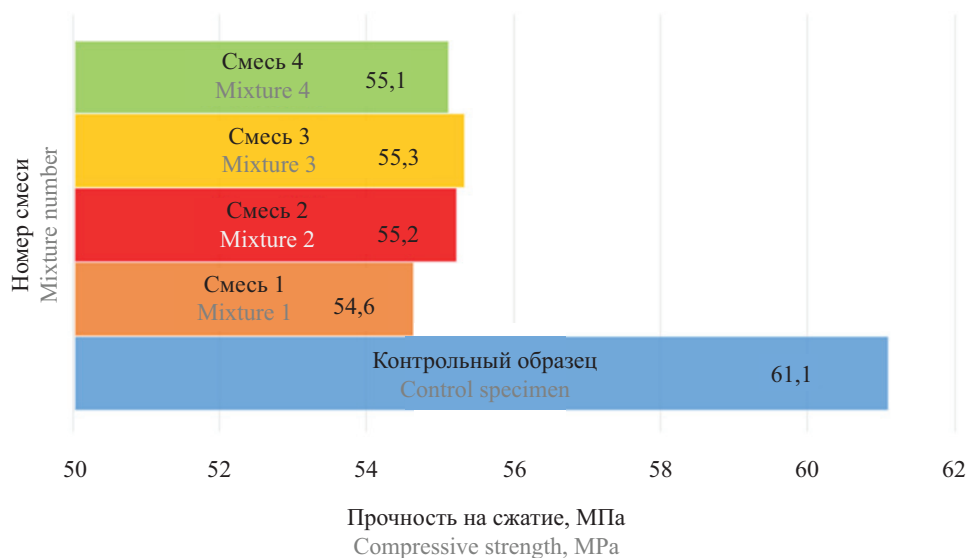


Рис. 6. Динамика изменения прочности на сжатие бетона в зависимости от резинового заполнителя [56]

Fig. 6. Dynamics of concrete compressive strength changes depending on the rubber aggregate [56]

ционального стандарта¹¹. Полученные данные показаны на рис. 6.

Как видно, замещение натурального мелкого заполнителя вторичным заполнителем, приготовленным из переработанных автомобильных шин, снижает прочность бетона на сжатие. Это было подтверждено результатами испытаний, прочность на сжатие образцов кубов, изготовленных из смесей с использованием резины, снизилась приблизительно на 10 %. Это может быть связано с низкой жесткостью и плохой текстурной поверхностью резиновых частиц, что привело к отсутствию сцепления между резиновыми частицами и окружающим цементным раствором. Однако все бетонные смеси соответствуют необходимой прочности для заданного класса бетона. Прочность бетона на сжатие незначительно увеличилась при уменьшении размера частиц резины. Это объясняется тем, что более мелкие частицы обладают лучшей способностью заполнять пустоты, что приводит к сокращению пустотного пространства и повышению прочности при сжатии. Кроме того, поскольку разрушение бетонных образцов, в первую очередь, происходит из-за расслаивания заполнителей и цементного теста, сцепление играет важную роль в определении прочности бетона. Смесь № 1 характеризуется более гладкой поверхностью, что способствует более слабому сцеплению резинового заполнителя с окружающим цементным раствором.

Испытание на определение подвижности бетонной смеси выполнено в соответствии с требова-

ниями национального стандарта¹². Результаты представлены на рис. 7.

При выполнении эксперимента отмечалось, что все бетонные смеси не подвержены расслоению или растеканию во время смешивания, укладки или уплотнения. Наибольшее значение осадки конуса 95 мм было зарегистрировано для контрольного образца. Смеси с использованием переработанных автомобильных шин характеризуются значениями осадки конуса ниже, чем у контрольного образца. Из этого результата можно сделать вывод, что при замещении резиной части песка наблюдалось общее снижение значений осадки конуса, независимо от размера частиц, вовлекаемого резинового порошка. В основном это объясняется более высоким водопоглощением частиц резины по сравнению с песком, что уменьшает количество свободной воды, тем самым уменьшая удобоукладываемость бетонной смеси. Уменьшение осадки по мере сокращения размера резиновых частиц связано с большей площадью поверхности и водопоглощаемостью частиц более дисперсной резины. Это означает, что во время перемешивания более мелкие частицы резины будут поглощать больше свободной воды, чем более крупные для достижения твердотельного состояния. Другой причиной может быть то, что поверхность мелких частиц резины более грубая. В процессе переработки отработанных автомобильных шин они разрезаются на мелкие кусочки перед отправкой в мельницу. Затем в течение определенного периода времени осуществляется процесс измельчения, прежде чем частицы резины разного раз-

¹¹ BS EN 12390-3:2009. Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens. British Standards Institution, London, United Kingdom.

¹² BS EN 12350-2:2009. Testing Fresh Concrete — Part 2: Slump-test. British Standards Institution, London, United Kingdom.

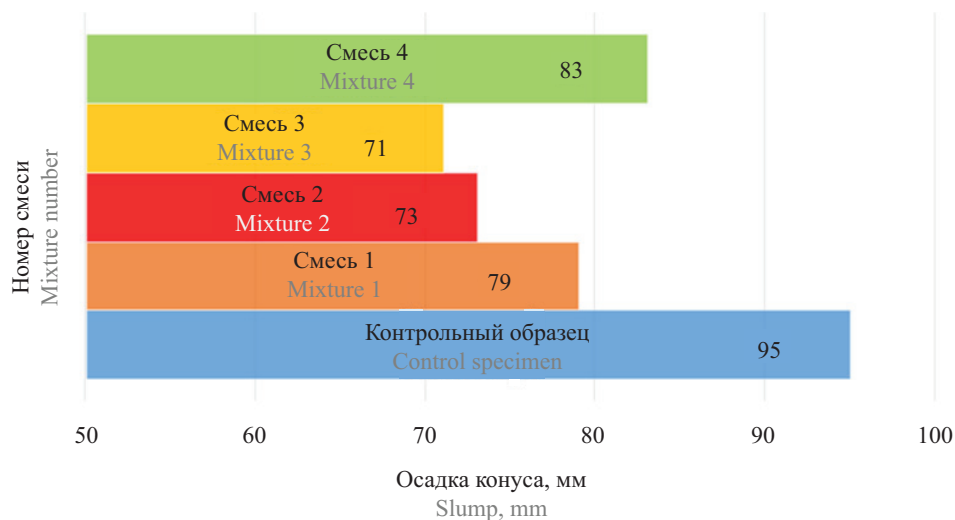


Рис. 7. Динамика изменения осадки конуса в зависимости от резинового заполнителя [56]

Fig. 7. Dynamics of slump changes depending on the rubber aggregate [56]

мера просеиваются и упаковываются, что приводит к появлению на поверхностях более дисперсных образцов вмятин и неровных участков [58].

Оценка плотности бетонной смеси выполнена в соответствии с требованиями национального стандарта¹³. Результаты представлены на рис. 8.

Таким образом, установлено, что при применении резины в составе бетона, независимо от размера ее частиц, наблюдается снижение плотности бетона. В основном это связано с различиями в плотности резиновых заполнителей. Снижение плотности бетона с использованием резинового заполнителя наибольшей фракции было наименьшим. Это согласуется с исходными значениями плотности резино-

вых заполнителей. Возможным объяснением такой зависимости является неполярная природа частиц резины, которая может приводить к способности отталкивать воду и задерживать воздух на своей поверхности, что впоследствии увеличивает количество воздушных пустот и снижает плотность бетона. При небольшом проценте замещения природного мелкого заполнителя вторичным из резиновых шин серьезного влияния на плотность бетона не оказывается.

Можно сделать вывод, что использование переработанных автомобильных шин в качестве замены мелкого заполнителя в бетоне может найти свое применение в дорожном строительстве для производства бордюров. Рециклинг резиновых шин представляет собой многообещающую стратегию, способствующую решению экологических проблем при незначительном снижении эксплуатационных

¹³ BS EN 12350-6:2009. Testing Fresh Concrete — Part 6: Density. British Standards Institution, London, United Kingdom.

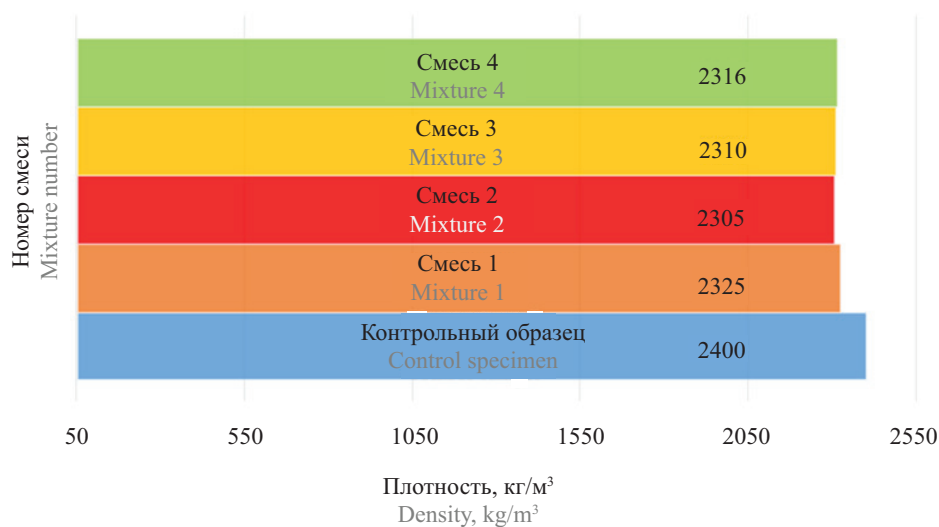


Рис. 8. Динамика изменения плотности бетона в зависимости от резинового заполнителя [56]

Fig. 8. Dynamics of concrete density changes depending on the rubber aggregate [56]

свойств и удешевлении производства. При условии проведения необходимых исследований и разработки соответствующих стандартов эта практика может стать важным шагом к более устойчивому и эффективному строительству.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненный обзор демонстрирует, что использование переработанного бетонного лома в качестве компонента для производства мелкоштучных бетонных изделий в дорожном строительстве является перспективным направлением. Применение вторичного бетонного сырья позволяет не только снизить потребление первичных природных ресурсов, но и решить проблему утилизации строительного вторичного сырья.

Исследования показали, что бетонные изделия, содержащие переработанный бетонный лом, обладают удовлетворительными физико-механическими характеристиками и могут использоваться в дорожном строительстве. В большинстве исследований вторичный заполнитель удовлетворяет требованиям к качеству, предъявляемым нормативными докумен-

тами, действующими в каждой стране. Потенциал применения переработанного бетона для производства мелкоштучной бетонной продукции велик, однако на данном этапе необходимо решить ряд важных отраслевых вопросов. Дальнейшее развитие этого направления требует проведения дополнительных исследований по оптимизации составов и технологии производства таких бетонных изделий.

Отмечается, что внедрение в технологию производства мелкоштучных бетонных изделий дисперсной молотой резины от автомобильных шин является перспективным, но мало изучаемым отраслевым направлением. В связи с этим особое внимание следует уделить оценке долговечности и эксплуатационных свойств готовой продукции с использованием различного вторичного сырья.

Таким образом, внедрение технологий рециклинга вторичного сырья даст возможность не только сократить объемы отходов, но и повысить экологическую и экономическую эффективность дорожного строительства. Это может снизить общую стоимость содержания, ремонта, реконструкции и строительства в дорожной отрасли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Короткова А.С., Скобелкин Ю.А. Проблемы утилизации отходов строительства в России // Юность и знания — гарантия успеха – 2022 : сб. науч. ст. 9-й Междунар. мол. науч. конф. 2022. С. 19–22. EDN GLJKMM.
2. Bjegovic D., Štirmer N., Serdar M. Ecological aspects of concrete production // 2nd International Conference on Sustainable construction materials and technologies. 2010. Pp. 1483–1492.
3. Енифанов В.А., Васильева Е.В. Развитие производства цемента в условиях современного рынка // Строительство. Экономика и управление. 2016. № 2 (22). С. 2–7. EDN YPJQVB.
4. Усов Б.А., Окольников Г.Э., Акимов С.Ю. Экология и производство строительных материалов // Системные технологии. 2015. № 4 (17). С. 84–105. EDN VLANJZ.
5. Puertas F., García-Díaz I., Barba A., Gazul-la M.F., Palacios M., Gómez M.P. et al. Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production // Cement and Concrete Composites. 2008. Vol. 30. Issue 9. Pp. 798–805. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.06.003
6. Röck M., Saade M.R.M., Balouktsi M., Rasmusen F.N., Birgisdottir H., Frischknecht R. et al. Embodied GHG emissions of buildings — the hidden challenge for effective climate change mitigation // Applied Energy. 2020. Vol. 258. P. 114107. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114107
7. Лесовик В.С., Шерemet А.А., Чулкова И.Л., Журавлева А.Э. Геоника (геомиметика) и поиск оптимальных решений в строительном материаловедении // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2021. Т. 18. № 1 (77). С. 120–134. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134. EDN HMWWZK.
8. Şanal İ. Significance of concrete production in terms of carbon dioxide emissions: Social and environmental impacts // Journal of Polytechnic. 2018. Vol. 21. Issue 2. Pp. 369–378. DOI: 10.2339/politeknik.389590
9. Сухинина Е.А. Строительство зданий из вторичного сырья с учетом требований экологических стандартов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 2. С. 186–201. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.186-201. EDN GMYLCK.
10. Токарев В.А., Кабалин М.Д., Грищенко М.С., Конорева О.В. Переработанный бетон как компонент для изготовления асфальтобетонной смеси : Обзор // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2024. № 2. С. 19–30. DOI: 10.15593/24111678/2024.02.02. EDN XLBMKG.
11. Gallagher L., Peduzzi P. Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources. UNEP, 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.33747.63526
12. Jang J.G., Park S.M., Chung S., Ahn J.W., Kim H.K. Utilization of circulating fluidized bed combustion ash in producing controlled low-strength materials with cement or sodium carbonate as activator //

Construction and Building Materials. 2018. Vol. 159. Pp. 642–651. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.158

13. Ricciardi P., Cillari G., Miino M.C., Collivignarelli M.C. Valorization of agro-industry residues in the building and environmental sector : a review // Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy. 2020. Vol. 38. Issue 5. Pp. 487–513. DOI: 10.1177/0734242x20904426

14. Кузнецов В.А., Лесовик В.С. Техногенное сырье для дорожных покрытий // Научные и инженерные проблемы строительно-технологической утилизации техногенных отходов. 2014. С. 115–118. EDN SCUPZT.

15. Лесовик В.С., Гридчин А.М., Муртазаев С.А.Ю., Сайдумов М.С., Ахмед А.А.А., Оцокков К.А. Бетоны для дорожного строительства с применением техногенных материалов // Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека : II Междунар. онлайн-конгресс, посвящ. 30-летию кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. 2019. С. 103–112. EDN XHSSDY.

16. Supino S., Malandrino O., Testa M., Sica D. Sustainability in the EU cement industry: the Italian and German experiences // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 112. Pp. 430–442. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.022

17. Collivignarelli M.C., Cillari G., Ricciardi P., Miino M.C., Torretta V., Rada E.C. et al. The production of sustainable concrete with the use of alternative aggregates : a review // Sustainability. 2020. Vol. 12. Issue 19. P. 7903. DOI: 10.3390/su12197903

18. Khatib J.M., Herki B.A., Kenai S. Capillarity of concrete incorporating waste foundry sand // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 47. Pp. 867–871. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.013

19. Наруть В.В., Ларсен О.А. Самоуплотняющиеся бетоны на основе бетонного лома сносимых жилых зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 2. С. 52–58. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.02.52-58. EDN HBXHF.

20. Самченко С.В., Воронин В.В., Ларсен О.А., Наруть В.В. Самоуплотняющийся бетон с компенсированной усадкой с использованием материалов из бетонного лома // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 2 (746). С. 71–78. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-746-2-71-78. EDN EYNTLL.

21. Larsen O., Samchenko S., Naruts V. Blended binder based on Portland cement and recycled concrete powder // Magazine of Civil Engineering. 2022. № 5 (113). DOI: 10.34910/MCE.113.6. EDN ZLGLFF.

22. Горчакова С.Д., Басалаев Н.А. Улучшение сборных бетонных бордюров с использованием резиновых и наноматериалов // Синергия Наук. 2017. № 11. С. 995–1004. EDN YQYYLP.

23. Thomas B.S., Gupta R.C. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 54. Pp. 1323–1333. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.092

24. Mohajerani A., Burnett L., Smith J.V., Markovski S., Rodwell G., Rahman M.T. et al. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations : a review // Resources, Conservation and Recycling. 2020. Vol. 155. P. 104679. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104679

25. Youssf O., Mills J.E., Hassanli R. Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 125. Pp. 175–183. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.040

26. Zhu H., Rong B., Xie R., Yang Z. Experimental investigation on the floating of rubber particles of crumb rubber concrete // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 164. Pp. 644–654. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.001

27. Sofi A. Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete : a review // Ain Shams Engineering Journal. 2018. Vol. 9. Issue 4. Pp. 2691–2700. DOI: 10.1016/j.asej.2017.08.007

28. Marie I. Zones of weakness of rubberized concrete behavior using the UPV // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 116. Pp. 217–222. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.096

29. Кисляков К.А., Яковлев Г.И., Первушин Г.Н. Свойства цементной композиции с применением боя керамического кирпича и микрокремнезема // Строительные материалы. 2017. № 1–2. С. 14–18. EDN XXHPX.

30. Денисевич Д.С., Димакова А.В., Шнайдер А.В., Ибе Е.Е. Физико-механические особенности материалов на основе бетонного лома // Вестник евразийской науки. 2020. Т. 12. № 3. С. 4. EDN OUIJBCN.

31. Ламжав О. Исследование свойств вторичного заполнителя и бетона, изготовленного из бетонного лома // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке : сб. ст. по мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 71–77. EDN YPXGZO.

32. Juan-Valdés A., Rodríguez-Robles D., García-González J., de Rojas M.I.S., Guerra-Romero M.I., Martínez-García R. et al. Recycled precast concrete kerbs and paving blocks, a technically viable option for footways // Materials. 2021. Vol. 14. Issue 22. P. 7007. DOI: 10.3390/ma14227007

33. Olofinnade O.M., Ede A.N., Ndambuki J.M., Bamigboye G. Structural properties of concrete containing ground waste clay brick powder as partial substitute for cement // Materials Science Forum. 2016. Vol. 866. Pp. 63–67. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.866.63

34. Heidari A., Hasanpour B. Effects of waste bricks powder of gachsaran company as a pozzolanic

material in concrete // *Asian Journal of Civil Engineering*. 2013. Vol. 14. Issue 5. Pp. 755–763.

35. *Aliabdo A.A., Abd-Elmoaty A.E.M., Hassan H.H.* Utilization of crushed clay brick in concrete industry // *Alexandria Engineering Journal*. 2014. Vol. 53. Issue 1. Pp. 151–168. DOI: 10.1016/j.aej.2013.12.003

36. *Ma Z., Tang Q., Wu H., Xu J., Liang C.* Mechanical properties and water absorption of cement composites with various fineness and contents of waste brick powder from C&D waste // *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 114. P. 103758. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103758

37. *Rens K.L.* Inventory and assessment of Denver, Colorado: Curb and gutters // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2007. Vol. 21. Issue 3. Pp. 249–254. DOI: 10.1061/(asce)0887-3828(2007)21:3(249)

38. *Fityus S.G., Cameron D.A., Walsh P.F.* The shrink swell test // *Geotechnical Testing Journal*. 2005. Vol. 28. Issue 1. Pp. 92–101. DOI: 10.1520/gtj12327

39. *Mokhtari M., Dehghani M.* Swell-shrink behavior of expansive soils, damage and control // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2012. Vol. 17. Pp. 2673–2682.

40. *Johnson T.* Trees, Stormwater, Soil and Civil Infrastructure: Synergies Towards Sustainable Urban Design. 2017.

41. *Sun X., Li J., Cameron D., Zhou A.* Field monitoring and assessment of the impact of a large eucalypt on soil desiccation // *Acta Geotechnica*. 2022. Vol. 17. Issue 5. Pp. 1971–1984. DOI: 10.1007/s11440-021-01308-4

42. *Li J., Zhou Y., Guo L., Tokhi H.* The establishment of a field site for reactive soil and tree monitoring in Melbourne // *Australian Geomechanics Journal*. 2014. Vol. 49. Pp. 63–72.

43. *Singh A.K., Nigam M., Kumar R.* Srivastava Study of stress profile in cement concrete road of expansive soil due to swell pressure // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 56. Pp. 347–355. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.184

44. *Momotaz H., Rahman M.M., Karim M.R., Zhuge Y., Ma X., Levett P.* Structural performance of fibre reinforced recycled aggregate concrete road kerb sections under monotonic and cyclic loading // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 438. P. 137329. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137329

45. *Gayarre F.L., López-Colina C., Serrano M.A., López-Martínez A.* Manufacture of concrete kerbs and floor blocks with recycled aggregate from C&DW // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 40. Pp. 1193–1199. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.040

46. *Chen J., Liu L., Zhou M., Huang Z., Li R., Zhang Z. et al.* Study on durability of recycled large aggregate concrete // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 371. Issue 4. P. 042016. DOI: 10.1088/1755-1315/371/4/042016

47. *Gholampour A., Ozbakkaloglu T.* Time-dependent and long-term mechanical properties of con-

cretes incorporating different grades of coarse recycled concrete aggregates // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 157. Pp. 224–234. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.12.015

48. *Mohammed A.S., Abbas A.L.* Mechanical Properties of Recycled Coarse Aggregate Concrete Made from Known Properties Demolition Waste. 2019.

49. *Kou S., Poon C.* Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 77. Pp. 501–508. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.035

50. *Momotaz H., Rahman M.M., Karim M.R., Zhuge Y., Ma X., Levett P.* Changes in flexural, tensile and impact characteristics of kerb concrete due to the addition of tyre-derived aggregates and polypropylene fibres // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 83. P. 108438. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.108438

51. *Ларсен О.А., Марков Ю.И., Василькин А.А.* Свойства гипсовых композитов с использованием заполнителя из отходов переработки автомобильных шин // *Техника и технология силикатов*. 2024. Т. 31. № 4. С. 354–364. DOI: 10.62980/2076-0655-2024-354-364. EDN КТҮННН

52. *Yang J., Du Q., Bao Y.* Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks // *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25. Issue 4. Pp. 1935–1945. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.063

53. *Marie I., Quiasrawi H.* Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates // *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 37. Pp. 243–248. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.07.020

54. *De Castro S., de Brito J.* Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates // *Journal of Cleaner Production*. 2013. Vol. 41. Pp. 7–14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.09.021

55. *Ling T.C., Poon C.S.* Use of recycled CRT funnel glass as fine aggregate in dry-mixed concrete paving blocks // *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 68. Pp. 209–215. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.12.084

56. *Su H., Yang J., Ling T.C., Ghataora G.S., Dirar S.* Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes // *Journal of Cleaner Production*. 2015. Vol. 91. Pp. 288–296. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.12.022

57. *Samchenko S.V., Larsen O.A.* Modifying the Sand Concrete with Recycled Tyre Polymer Fiber to Increase the Crack Resistance of Building Structures // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Issue 4. P. 897. DOI: 10.3390/buildings13040897

58. *Youssf O., Mills J.E., Benn T., Zhuge Y., Ma X., Roychand R. et al.* Development of crumb rubber concrete for practical application in the residential construction sector — design and processing // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 260. P. 119813. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119813

Поступила в редакцию 19 декабря 2024 г.

Принята в доработанном виде 27 марта 2025 г.

Одобрена для публикации 27 марта 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Алексеевич Токарев — аспирант кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина; Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; ResearcherID: HDO-5844-2022, ORCID: 0000-0002-3110-1440; tokareva161@mail.ru;

Максим Дмитриевич Кабалин — аспирант кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина; Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; maksipit13@gmail.com;

Михаил Сергеевич Грищенко — студент; Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; mishal10944@yandex.ru;

Марина Алексеевна Высоцкая — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина; Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; roruri@rambler.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Korotkova A.S., Skobelkin Yu.A. Problems of construction waste disposal in Russia. *Youth and knowledge — a guarantee of success – 2022 : collection of scientific articles of the 9th International Youth Scientific Conference*. 2022; 19-22. EDN GLJKMM. (rus.).
2. Bjegovic D., Štirmer N., Serdar M. Ecological aspects of concrete production. *2nd International Conference on Sustainable construction materials and technologies*. 2010; 1483-1492.
3. Epifanov V.A., Vasileva E.V. Development of cement production in today's market. *Construction. Economics and Management*. 2016; 2(22):2-7. EDN YPJQB. (rus.).
4. Usov B.A., Okolnikova G.E., Akimov S.Yu. Ecology and production of construction materials. *System Technologies*. 2015; 4(17):84-105. EDN VLANJZ. (rus.).
5. Puertas F., García-Díaz I., Barba A., Gazulla M.F., Palacios M., Gómez M.P. et al. Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production. *Cement and Concrete Composites*. 2008; 30(9):798-805. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.06.003
6. Röck M., Saade M.R.M., Balouktsi M., Rasmussen F.N., Birgisdottir H., Frischknecht R. et al. Embodied GHG emissions of buildings — the hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*. 2020; 258:114107. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114107
7. Lesovik V.S., Sheremet A.A., Chulkova I.L., Zhuravleva A.E. Geonics (geomimetics) and search for optimal solutions in building materials science. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18(1):(77):120-134. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134. EDN HMWWZK. (rus.).
8. Şanal İ. Significance of concrete production in terms of carbondioxide emissions: Social and environmental impacts. *Journal of Polytechnic*. 2018; 21(2):369-378. DOI: 10.2339/politeknik.389590
9. Sukhinina E.A. Using secondary raw materials in construction of buildings with account taken of environmental standards. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(2):186-201. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.186-201. EDN GMYLCK. (rus.).
10. Tokarev V.A., Kabalin M.D., Grishchenko M.S., Konoreva O.V. Recycled concrete as a component for the production of asphalt concrete mixture : Review. *Transport. Transport Facilities. Ecology*. 2024; 2:19-30. DOI: 10.15593/24111678/2024.02.02. EDN XLBMKG. (rus.).
11. Gallagher L., Peduzzi P. *Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources*. UNEP, 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.33747.63526
12. Jang J.G., Park S.M., Chung S., Ahn J.W., Kim H.K. Utilization of circulating fluidized bed combustion ash in producing controlled low-strength materials with cement or sodium carbonate as activator. *Construction and Building Materials*. 2018; 159:642-651. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.158
13. Ricciardi P., Cillari G., Miino M.C., Collivignarelli M.C. Valorization of agro-industry residues in the building and environmental sector : a review. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*. 2020; 38(5):487-513. DOI: 10.1177/0734242x20904426
14. Kuznetsov V.A., Lesovik V.S. Man-made raw materials for road surfaces. *Scientific and engineering*

problems of construction and technological utilization of man-made waste. 2014; 115-118. EDN SCUPZT. (rus.).

15. Lesovik V.S., Gridchin A.M., Murtazaev S.A.Yu., Saidumov M.S., Akhmed A.A.A., Otsokov K.A. Concretes for road construction using technogenic materials. *Nature-like technologies of building composites for protecting the human environment : II International Online Congress dedicated to the 30th anniversary of the Department of Construction Materials Science, Products and Structures*. 2019; 103-112. EDN XHSSDY. (rus.).

16. Supino S., Malandrino O., Testa M., Sica D. Sustainability in the EU cement industry: the Italian and German experiences. *Journal of Cleaner Production*. 2016; 112:430-442. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.022

17. Collivignarelli M.C., Cillari G., Ricciardi P., Miino M.C., Torretta V., Rada E.C. et al. The production of sustainable concrete with the use of alternative aggregates : a review. *Sustainability*. 2020; 12(19):7903. DOI: 10.3390/su12197903

18. Khatib J.M., Herki B.A., Kenai S. Capillarity of concrete incorporating waste foundry sand. *Construction and Building Materials*. 2013; 47:867-871. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.013

19. Naruts V.V., Larsen O.A. Self-compacting concrete on the basis of concrete scrap of demolished residential buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 2:52-58. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.02.52-58. EDN HBXHIF. (rus.).

20. Samchenko S.V., Voronin V.V., Larsen O.A., Naruts V.V. Self-compacting concrete with compensated shrinkage based on recycled concrete materials. News of Higher Educational Institutions. *Construction*. 2021; 2(746):71-78. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-746-2-71-78. EDN EYNTLL. (rus.).

21. Larsen O., Samchenko S., Naruts V. Blended binder based on Portland cement and recycled concrete powder. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 5(113). DOI: 10.34910/MCE.113.6. EDN ZLGLFF.

22. Gorchakova S.D., Basalaeв N.A. Improvement of precast concrete curbs using rubber and nanomaterials. *Synergy of Sciences*. 2017; 11:995-1004. EDN YQYYLP. (rus.).

23. Thomas B.S., Gupta R.C. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; 54:1323-1333. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.092

24. Mohajerani A., Burnett L., Smith J.V., Markovski S., Rodwell G., Rahman M.T. et al. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations : a review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020; 155:104679. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104679

25. Youssf O., Mills J.E., Hassanli R. Assessment of the mechanical performance of crumb rubber

concrete. *Construction and Building Materials*. 2016; 125:175-183. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.040

26. Zhu H., Rong B., Xie R., Yang Z. Experimental investigation on the floating of rubber particles of crumb rubber concrete. *Construction and Building Materials*. 2018; 164:644-654. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.001

27. Sofi A. Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete : a review. *Ain Shams Engineering Journal*. 2018; 9(4):2691-2700. DOI: 10.1016/j.asej.2017.08.007

28. Marie I. Zones of weakness of rubberized concrete behavior using the UPV. *Journal of Cleaner Production*. 2016; 116:217-222. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.096

29. Kislyakov K.A., Yakovlev G.I., Pervushin G.N. Properties of cement composition with addition of crushed clay brick and microsilica. *Construction Materials*. 2017; 1-2:14-18. EDN XXIHPX. (rus.).

30. Denisevich D.S., Dimakova A.V., Shnyder A.V., Ibe E.E. Physical and mechanical features of materials on the basis of concrete scrap. *The Eurasian Scientific Journal*. 2020; 12(3):4. EDN OUJBCN. (rus.).

31. Lamzhav O. Study of the properties of secondary filler and concrete made from concrete scrap. *Experimental and theoretical research in modern science : collection of articles based on the materials of the VIII international scientific and practical conference*. 2017; 71-77. EDN YPXGZO. (rus.).

32. Juan-Valdés A., Rodríguez-Robles D., García-González J., de Rojas M.I.S., Guerra-Romero M.I., Martínez-García R. et al. Recycled precast concrete kerbs and paving blocks, a technically viable option for footways. *Materials*. 2021; 14(22):7007. DOI: 10.3390/ma14227007

33. Olofinnade O.M., Ede A.N., Ndambuki J.M., Bamigboye G. Structural properties of concrete containing ground waste clay brick powder as partial substitute for cement. *Materials Science Forum*. 2016; 866:63-67. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.866.63

34. Heidari A., Hasanpour B. Effects of waste bricks powder of gachsaran company as a pozzolanic material in concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2013; 14(5):755-763.

35. Aliabdo A.A., Abd-Elmoaty A.E.M., Hassan H.H. Utilization of crushed clay brick in concrete industry. *Alexandria Engineering Journal*. 2014; 53(1):151-168. DOI: 10.1016/j.aej.2013.12.003

36. Ma Z., Tang Q., Wu H., Xu J., Liang C. Mechanical properties and water absorption of cement composites with various fineness and contents of waste brick powder from C&D waste. *Cement and Concrete Composites*. 2020; 114:103758. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103758

37. Rens K.L. Inventory and assessment of Denver, Colorado: Curb and gutters. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2007; 21(3):249-254. DOI: 10.1061/(asce)0887-3828(2007)21:3(249)

38. Fityus S.G., Cameron D.A., Walsh P.F. The shrink swell test. *Geotechnical Testing Journal*. 2005; 28(1):92-101. DOI: 10.1520/gtj12327
39. Mokhtari M., Dehghani M. Swell-shrink behavior of expansive soils, damage and control. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2012; 17:2673-2682.
40. Johnson T. *Trees, Stormwater, Soil and Civil Infrastructure: Synergies Towards Sustainable Urban Design*. 2017.
41. Sun X., Li J., Cameron D., Zhou A. Field monitoring and assessment of the impact of a large eucalypt on soil desiccation. *Acta Geotechnica*. 2022; 17(5):1971-1984. DOI: 10.1007/s11440-021-01308-4
42. Li J., Zhou Y., Guo L., Tokhi H. The establishment of a field site for reactive soil and tree monitoring in Melbourne. *Australian Geomechanics Journal*. 2014; 49:63-72.
43. Singh A.K., Nigam M., Kumar R. Srivastava Study of stress profile in cement concrete road of expansive soil due to swell pressure. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 56:347-355. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.184
44. Momotaz H., Rahman M.M., Karim M.R., Zhuge Y., Ma X., Levett P. Structural performance of fibre reinforced recycled aggregate concrete road kerb sections under monotonic and cyclic loading. *Construction and Building Materials*. 2024; 438:137329. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137329
45. Gayarre F.L., López-Colina C., Serrano M.A., López-Martínez A. Manufacture of concrete kerbs and floor blocks with recycled aggregate from C&DW. *Construction and Building Materials*. 2013; 40:1193-1199. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.040
46. Chen J., Liu L., Zhou M., Huang Z., Li R., Zhang Z. et al. Study on durability of recycled large aggregate concrete. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*. 2019; 371(4):042016. DOI: 10.1088/1755-1315/371/4/042016
47. Gholampour A., Ozbakkaloglu T. Time-dependent and long-term mechanical properties of concretes incorporating different grades of coarse recycled concrete aggregates. *Engineering Structures*. 2018; 157:224-234. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.12.015
48. Mohammed A.S., Abbas A.L. *Mechanical Properties of Recycled Coarse Aggregate Concrete Made from Known Properties Demolition Waste*. 2019.
49. Kou S., Poon C. Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2015; 77:501-508. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.014.12.035
50. Momotaz H., Rahman M.M., Karim M.R., Zhuge Y., Ma X., Levett P. Changes in flexural, tensile and impact characteristics of kerb concrete due to the addition of tyre-derived aggregates and polypropylene fibres. *Journal of Building Engineering*. 2024; 83:108438. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.108438
51. Larsen O., Markov Yu., Vasil'kin A. Properties of gypsum composites using aggregate from automobile tire recycling waste. *Technique and Technology of Silicates*. 2024; 31(4):354-364. DOI: 10.62980/2076-0655-2024-354-364. EDN KTYHWZ. (rus.)
52. Yang J., Du Q., Bao Y. Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*. 2011; 25(4):1935-1945. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.063
53. Marie I., Quiasrawi H. Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*. 2012; 37:243-248. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.07.020
54. De Castro S., de Brito J. Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates. *Journal of Cleaner Production*. 2013; 41:7-14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.09.021
55. Ling T.C., Poon C.S. Use of recycled CRT funnel glass as fine aggregate in dry-mixed concrete paving blocks. *Journal of Cleaner Production*. 2014; 68:209-215. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.12.084
56. Su H., Yang J., Ling T.C., Ghataora G.S., Dirar S. Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*. 2015; 91:288-296. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.12.022
57. Samchenko S.V., Larsen O.A. Modifying the Sand Concrete with Recycled Tyre Polymer Fiber to Increase the Crack Resistance of Building Structures. *Buildings*. 2023; 13(4):897. DOI: 10.3390/buildings13040897
58. Youssf O., Mills J.E., Benn T., Zhuge Y., Ma X., Roychand R. et al. Development of crumb rubber concrete for practical application in the residential construction sector — design and processing. *Construction and Building Materials*. 2020; 260:119813. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119813

Received December 19, 2024.

Adopted in revised form on March 27, 2025.

Approved for publication on March 27, 2025.

BIONOTES: Vladimir A. Tokarev — postgraduate student of the Department of Highways and Railways named after A.M. Gridchin; Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov); 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ResearcherID: HDO-5844-2022, ORCID: 0000-0002-3110-1440; tokareva161@mail.ru;

Maksim D. Kabalin — postgraduate student of the Department of Highways and Railways named after A.M. Gridchin; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; maksipit13@gmail.com;

Mihail S. Grishchenko — student; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; mishal10944@yandex.ru;

Marina A. Vysotskaya — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Highways and Railways named after A.M. Gridchin; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; roruri@rambler.ru.

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

The authors declare no conflict of interest.

Оценка возможности и эффективности использования террикоников Кизеловского угольного бассейна в качестве минеральной добавки в цементных системах

Андрей Алексеевич Талейко, Степан Васильевич Леонтьев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ); г. Пермь, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение минеральных добавок (МД) для цементов и материалов, изготавливаемых на цементной основе, позволяет не только придавать им специальные свойства, но и увеличивает объемы их производства и использования, а также решает вопросы утилизации отходов промышленности. Так, в Пермском крае на территории Кизеловского угольного бассейна не решенной остается проблема ликвидации большого количества отходов угледобычи (террикоников). Цель исследования — оценить возможность и эффективность применения террикоников в качестве МД в цементных системах.

Материалы и методы. Использовался портландцемент типа ЦЕМ I, перегоревший терриконик («красный» терриконик), негорелый терриконик («черный» терриконик), а также монофракционный кварцевый песок. Термоактивация «черного» терриконика проводилась при 700 °С в муфельной печи в течение двух часов. Химический состав террикоников определялся флуоресцентным рентгеноспектральным методом, минералогический состав — методом экспрессного рентгенографического количественного фазового анализа, термический анализ — методом синхронного ДСК/ТГ анализа. Пределы прочности при изгибе и сжатии цементного камня определялись по ГОСТ 310.4–81.

Результаты. Результаты химического и минералогического анализа показали, что «красный» терриконик состоит в основном из кварца (65,9 %), что может указывать на его пуццоланическую активность, а «черный» терриконик состоит главным образом из каолинита (41 %) и кварца (28,3 %). Наличие каолинита свидетельствует о возможности получения из данного материала активной минеральной добавки — метакаолинита. Результаты определения пределов прочности при изгибе и сжатии образцов показали, что замена 10–30 % цемента «красным» террикоником практически не снижает прочности раствора, а при замене 20 % цемента «черным» террикоником прочность на сжатие увеличивается на 21 %.

Выводы. Результаты химического, минералогического и термического анализа террикоников показали возможность их применения в качестве МД в цементах и цементных системах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: отходы угледобычи, терриконики, Кизеловский угольный бассейн, горелый терриконик, минеральная добавка, метакаолинит, термоактивация

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Талейко А.А., Леонтьев С.В. Оценка возможности и эффективности использования террикоников Кизеловского угольного бассейна в качестве минеральной добавки в цементных системах // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 6. С. 920–931. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.920-931

Автор, ответственный за переписку: Андрей Алексеевич Талейко, taleiko.99@mail.ru.

Estimation of possibility and efficiency of using coal gangue from Kizel coal basin as a mineral additive in cement systems

Andrei A. Taleiko, Stepan V. Leontev

Perm National Research Polytechnic University (PNRPU); Perm, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The use of mineral additives (MA) for cements and cement-based materials allows not only to give them special properties, but also increases the volume of their production and use, as well as solves the issues of industrial waste utilization. For example, in Perm Krai in the territory of the Kizel coal basin the problem of liquidation of a large amount of coal mining waste (coal gangue) remains unsolved. The aim of the research is to evaluate the possibility and efficiency of using coal gangue as mineral additives in cement systems.

Materials and methods. Portland cement CEM I, self-ignited coal gangue, not ignited coal gangue and also uniform quartz sand were used as raw materials. Not ignited coal gangue was thermal activated at the temperature of 700 °C in muffle furnace during 2 hours. Chemical composition of coal gangue was determined by the fluorescent X-ray spectral method and mineral composition by the method of rapid radiographic quantitative phase analysis. Thermal analysis was conducted by synchronous DSC/TG analysis method. Flexural and compressive strength of cement mortar were determined according to GOST 310.4–81 method.

Results. According to the results of chemical and mineral analysis it was obtained that self-ignited coal gangue is mainly consisted of quartz (65.9 %) that may indicate pozzolanic properties. Whereas not ignited coal gangue mainly consists of kaolinite (41 %)

and quartz (28.3 %). The presence of kaolinite, which was also confirmed by endothermic effect on the thermogram, enables to produce active mineral admixture — metakaolinite by thermal activation. It was obtained that flexural and compressive strength of mortar with 10–30 % cement replacement by self-ignited coal gangue is not reduced. Whereas compressive strength of specimens with 20 % cement replacement by thermal activated not ignited coal gangue is increased by 21 %.

Conclusions. The possibility of utilization of Kizel coal gangue as supplementary cementitious material was established by chemical, mineral and thermal analyses.

KEYWORDS: wastes of coal mining, coal gangue, Kizel coal basin, self-ignited coal gangue, supplementary cementitious material, metakaolinite, thermal activation

FOR CITATION: Taleiko A.A., Leontev S.V. Estimation of possibility and efficiency of using coal gangue from Kizel coal basin as a mineral additive in cement systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(6):920-931. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.920-931 (rus.).

Corresponding author: Andrei A. Taleiko, taleiko.99@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

С увеличением численности населения мира, урбанизацией и повышением объемов строительства возрастает потребность в строительных материалах и изделиях.

Одними из самых востребованных строительных материалов являются портландцемент и композиты, изготовленные на его основе. Вместе с этим растет количество выбросов пыли и углекислого газа в атмосферу. Уже сегодня на цементную промышленность приходится до 8 % мировых выбросов углекислого газа [1]. Для увеличения объемов производства портландцемента, а также решения усугубляющейся экологической проблемы, связанной с производством данного вида вяжущего, используются различные методы и подходы. Один из наиболее распространенных и эффективных методов — применение минеральных добавок (МД) [2], которые вводятся в цемент, или материалы на его основе, например, растворы и бетоны с целью замены части вяжущего или для придания материалу специальных свойств. В качестве МД используются различные материалы природного и техногенного происхождения. Применение техногенных материалов также помогает решать другую немаловажную экологическую проблему, связанную с рациональной утилизацией промышленных отходов, в том числе и тех, которые долгие годы скапливаются в отвалах. Техногенные отходы, применение которых в производстве строительных материалов активно изучается, — это отходы угледобычи. К возможным областям использования отходов угледобычи в производстве строительных материалов и изделий относят получение заполнителей плотных и искусственных пористых, минеральных добавок для цементов и бетонов, портландцементного клинкера, геополлимерных вяжущих и др. [3]. Однако отходы угледобычи каждого конкретного угольного бассейна или даже шахты требуют отдельной оценки для выявления пригодности их использования в производстве строительных материалов.

В Пермском крае на территории Кизеловского угольного бассейна расположены значительные запасы терриконигов — отвалов, состоящих из отходов угледобычи. Объем этих запасов оценивается

в 13 млн м³, из которых порядка 4,4 млн м³ составляют перегоревшие («красные») терриконики [4]. Вопросам применения кизеловских терриконигов в качестве сырья для производства строительных материалов посвящено немало исследований. Так, учеными была изучена возможность получения керамических строительных материалов на основе «черных» (негорелых) и «красных» терриконигов [5–7]. Дана оценка возможности получения низкомарочных вяжущих веществ на основе данных материалов с низким содержанием портландцемента или без него [8]. Исследования по применению кизеловских терриконигов в качестве мелкого и крупного заполнителя для бетонов не дали положительных результатов [4]. Одним из перспективных направлений исследований в рассматриваемой области является изучение возможности использования терриконигов как МД для цементов и композиционных материалов, получаемых на его основе.

Имеются результаты исследований по вопросам применения отходов угледобычи в качестве МД для цементов и цементных систем. Так, использование «черных» терриконигов в исходном виде отмечается нецелесообразным, поэтому этот материал требует активации перед применением. Показано [9], что наиболее эффективный способ активации «черных» терриконигов — это тонкий помол с последующим обжигом при температуре 500–800 °С. Авторы работы [10] установили, что наилучшие результаты по прочности на сжатие цементного раствора дает добавка терриконики, обожженного при 700 °С при выдержке в течение 1 ч при данной температуре. Введение в смесь обожженного при 850 °С в течение двух часов «черного» терриконики с содержанием 51 % каолинита способствовало приросту прочности цементного камня (ЦК) по сравнению с образцами, модифицированными добавкой молотого кварцевого песка [11]. Авторы также выяснили, что данный эффект обусловлен взаимодействием активных SiO₂ и Al₂O₃ с Ca(OH)₂ с образованием C-S-H и C-A-H геля, а также реакцией активного Al₂O₃ с Ca(OH)₂ и CaSO₄ с формированием Aft-фазы. Активность обожженных терриконигов с содержанием каолинита обусловлена трансформацией последнего

при температуре 500 °С в метакаолинит путем дегидратации с разрушением слоевой кристаллической структуры и деполимеризации силикатов [12].

Применение перегоревших террикоников различного происхождения в цементных материалах также широко исследуется. Так, автор публикации [13] получил мелкозернистый цементный бетон марки М200, М250 с заменой 30 % цемента тонкомолотым до удельной поверхности 7500–8000 см²/г «красным» террикоником. Также была отмечена архитектурная выразительность этого материала за счет придания ему розового оттенка. При замене цемента в растворе горелым террикоником в объеме 10 и 20 % незначительно снижается прочность на сжатие, а при использовании метода твердения в среде углекислого газа даже возрастает в более поздние сроки [14]. При этом отмечается более низкая проницаемость ионов хлора в материале с добавкой терриконика. Более подробный обзор исследований в области применения отходов угледобычи в технологии вяжущих материалов дан авторами настоящей работы в статье [15].

Тем не менее, несмотря на достаточно большое количество исследований в области использования террикоников в качестве МД, терриконики каждого конкретного угольного месторождения обладают своим уникальным составом, что требует проведения более углубленного и тщательного изучения

на предмет возможности их применения в производстве строительных материалов и изделий.

Цель настоящего исследования — оценка возможности и эффективности использования террикоников Кизеловского угольного бассейна в качестве минеральной добавки для производства портландцемента и композиционных вяжущих веществ на их основе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходными материалами стали: портландцемент типа ЦЕМ I 32,5 Н производства Горнозаводскцемент; «красный» терриконик из отвала п. Шахта Пермского края и «черный» терриконик из отвала п. Шумихинский. Гранулометрический состав отобранных проб террикоников представлен в табл. 1. В исследовании использовалась фракция 0–5 мм. В качестве мелкого заполнителя для приготовления раствора использовался монофракционный кварцевый песок фракции 0,5–1,0 мм. Применялась вода водопроводная.

В целях активации терриконики подвергались тонкому измельчению мелющими телами в фарфоровом барабане до фракции <0,08 мм. Порошок «черного» терриконика подвергался обжигу в лабораторной муфельной печи при температуре 700 °С с выдержкой при данной температуре в течение двух часов. Скорость подъема температуры

Табл. 1. Гранулометрический состав проб террикоников

Table 1. Grain-size composition of coal gangue

<i>«Красный» терриконик</i> <i>Self-ignited coal gangue</i>								
Номер сита / Sieve Number	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
Частный остаток, % Partial sieve residue, %	17	16	11	14	8	9	8	16
Полный остаток, % Full sieve residue, %	17	33	44	58	67	76	84	100
<i>«Черный» терриконик</i> <i>Not ignited coal gangue</i>								
Частный остаток, % Partial sieve residue, %	17	18	12	19	13	10	5	5
Полный остаток, % Full sieve residue, %	17	36	47	67	80	90	95	100

Табл. 2. Химический состав террикоников

Table 2. Chemical composition of coal gangue

Материал Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	K ₂ O	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	MnO	п.п.п. / р.р.р. LOI
«Красный» терриконик Self-ignited coal gangue	47,17	18,22	11,97	9,20	3,23	2,34	1,45	0,75	0,13	0,07	0,03	0,02	5,14
«Черный» терриконик Not ignited coal gangue	28,15	15,11	13,16	4,18	0,41	1,77	1,46	0,40	0,05	0,11	0,09	0,01	31,4–34,9

Табл. 3. Минералогический состав террикоников

Table 3. Mineralogical composition of coal gangue

Минерал / Mineral	«Красный» терриконик Self-ignited coal gangue	«Черный» терриконик Not ignited coal gangue
Кварц / Quartz	65,9	28,3
Калиевые полевые шпаты / Potassium Feldspar	2,2	5,6
Плагиоклазы / Plagioclases	4,1	6
Слюды / Micas	4,5	8,6
Бассанит / Bassanite	4,8	–
Гипс / Gypsum	3,4	1,5
Ангидрит / Anhydride	0,3	1,4
Кальцит / Calcite	5,9	–
Доломит / Dolomite	0,5	–
Гематит / Hematite	8,4	2,6
Магнетит / Magnetite	–	2,5
Каолинит / Kaolinite	–	41,3
Ярозит / Jarosite	–	2,2

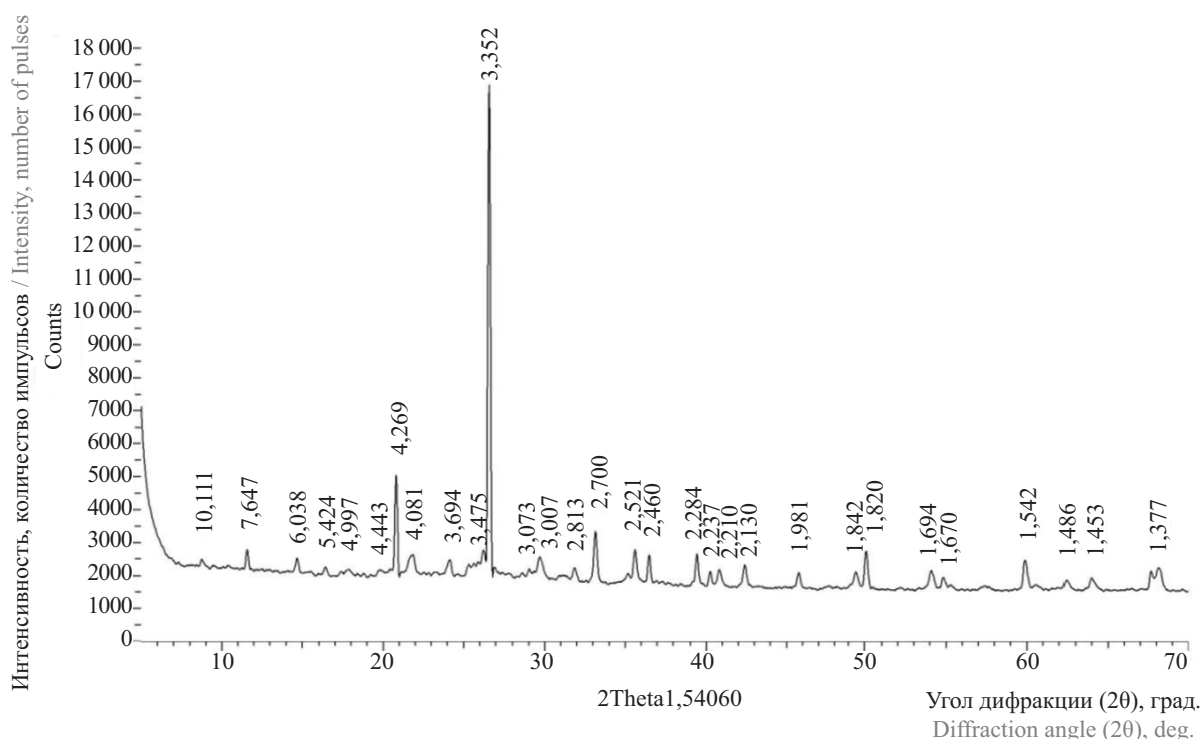
составляла 5 °С/мин. Режим термической активации «черного» терриконика был выбран опытным путем с учетом литературных данных.

Для оценки применимости террикоников в качестве МД к цементу и цементным материалам проведен химический, минералогический, а также термический анализы. Химический состав террикоников определялся флуоресцентным рентгеноспектральным методом, минералогический состав — методом экспрессного рентгенографического количественно-

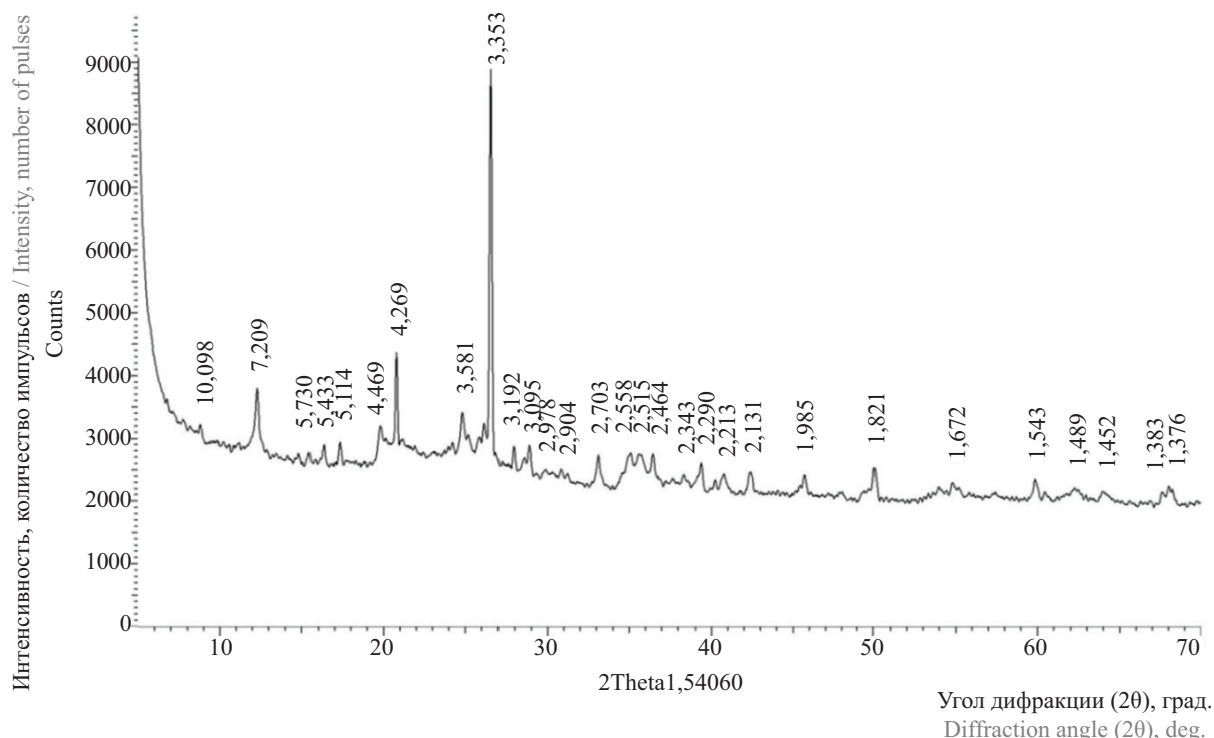
го фазового анализа. Результаты анализа химического и минералогического составов терриконика приведены в табл. 2, 3.

Дифрактограммы проб «красного» и «черного» терриконика представлены на рис. 1. Термический анализ террикоников выполнялся методом синхронного ДСК/ТГ анализа.

Для оценки физико-механических характеристик материала, полученного с использованием терриконика в качестве МД, и эффективности его



a



b

Рис. 1. Дифрактограмма пробы «красного» терриконика (a); «черного» терриконика (b)

Fig. 1. Diffraction pattern of self-ignited coal gangue (a); of not ignited coal gangue (b)

применения в составе вяжущего или композита изготовили образцы ЦК, в которых часть цемента (10, 20 и 30 %) заменялась тонкомолотым террикоником. Контрольный состав раствора без добавления терриконика изготавливался из растворной смеси нормальной консистенции по ГОСТ 310.4–81 при В/Ц = 0,4. Отношение количества воды к сумме цемента и добавки терриконика сохранялось для всех составов на уровне 0,4.

Формование образцов-призм размерами 40 × 40 × 160 мм производилось на лабораторной виброплощадке. Образцы твердели в нормальных условиях в соответствии с ГОСТ 310.4–81. Для определения пределов прочности при изгибе и сжатии в возрасте 28 сут образцы испытывались на изгиб на приборе МИИ-100, а также на сжатие на гидравлическом прессе ПГМ-1000МГ4.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам химического и минералогического анализа определено, что «красный» терриконик представляет собой алюмосиликатный материал, преимущественно состоящий из кварца с включением до 9 % сульфатных соединений и до 5 % несгоревшего угля. Наличие в составе кварца может указывать на возможную пуццоланическую активность «красного» терриконика. В работах [16, 17] отмечена пуццоланическая актив-

ность перегоревших пород терриконов со схожим составом.

«Черный» терриконик состоит преимущественно из каолинита (до 41 %) и кварца (до 28 %) со значительным включением угля (потери при прокаливании составили от 31 до 34 %). Наличие каолинита позволяет использовать данный материал для получения путем обжига при температурах 500–800 °С метакаолинита [9], который, как известно [18], обладает высокой пуццоланической активностью.

Также, для того чтобы оценить пригодность исследуемых терриконов для использования их в качестве МД для цементных материалов, проведено сравнение их химических составов с составами, опубликованными в современной научной литературе. Для этого составы «красных» и «черных» терриконов были нанесены на тройную диаграмму SiO₂-Al₂O₃-CaO (рис. 2).

В результате можно видеть близость расположения точек, характеризующих состав исследуемых терриконов, и точек, отражающих состав терриконов из указанных работ, в которых была показана возможность использования данных материалов в качестве МД в цементных системах.

По результатам проведенного термического анализа выяснено, что на дериватограмме образца «красного» терриконика (рис. 3, a) присутствует эндотермический эффект в районе 150 °С, что можно связать с процессом дегидратации двуводного гипса

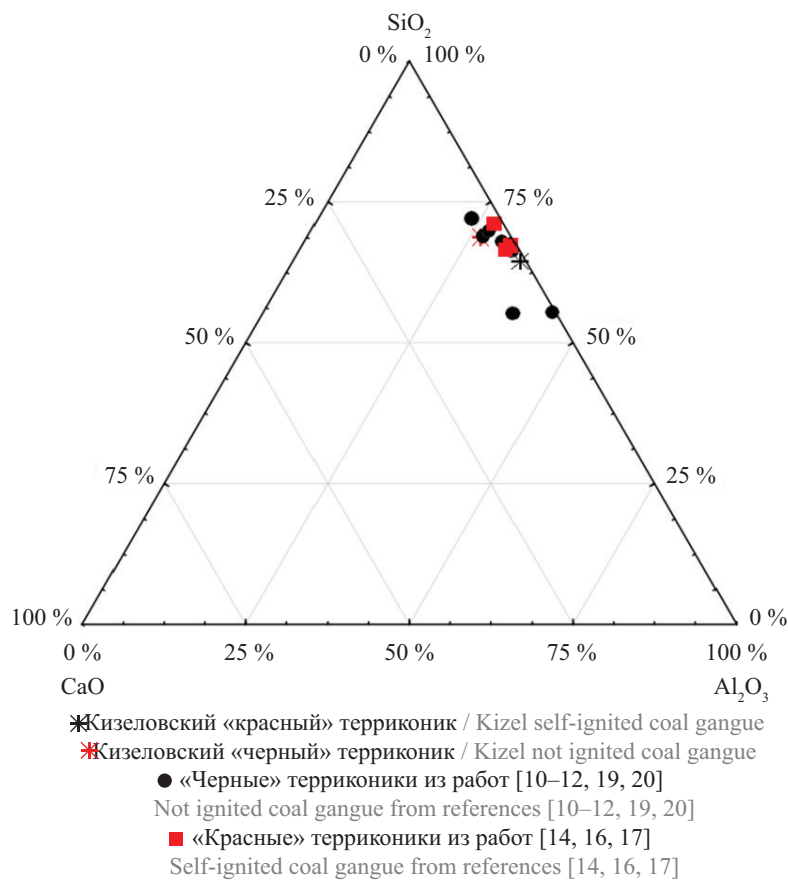
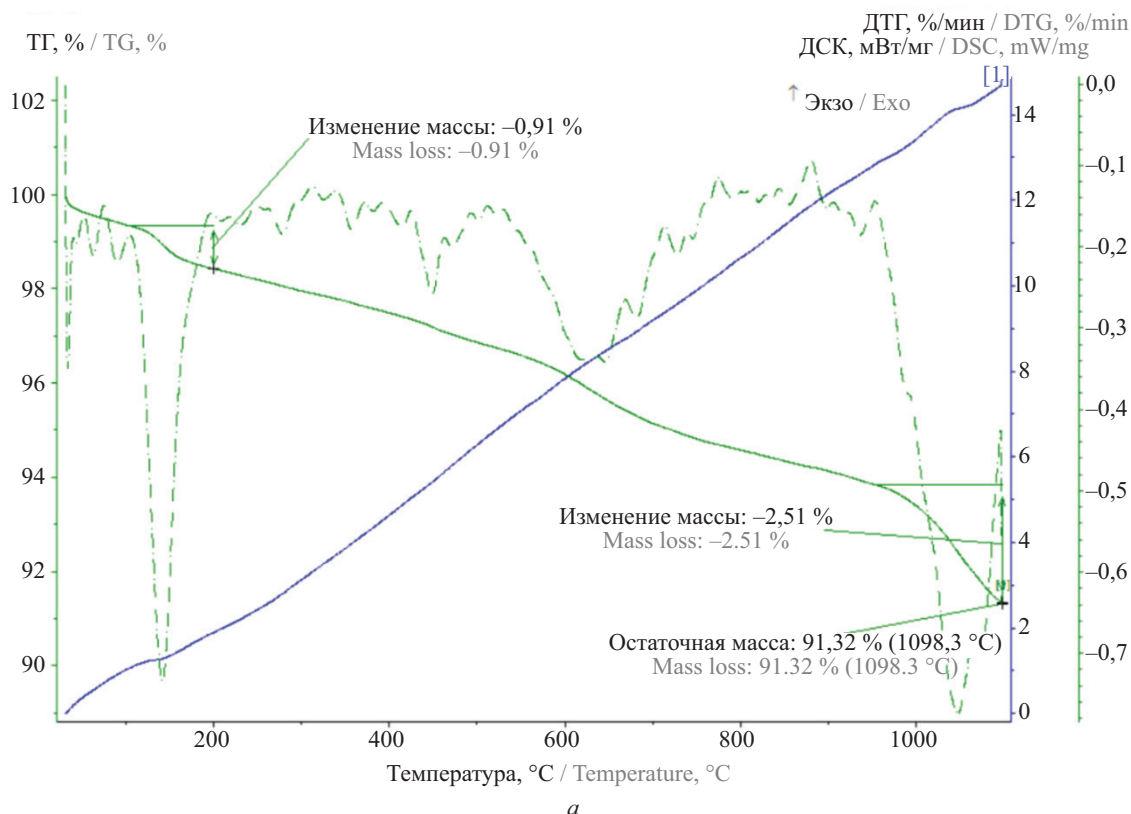


Рис. 2. Тройная диаграмма SiO₂-Al₂O₃-CaO

Fig. 2. Ternary diagram SiO₂-Al₂O₃-CaO



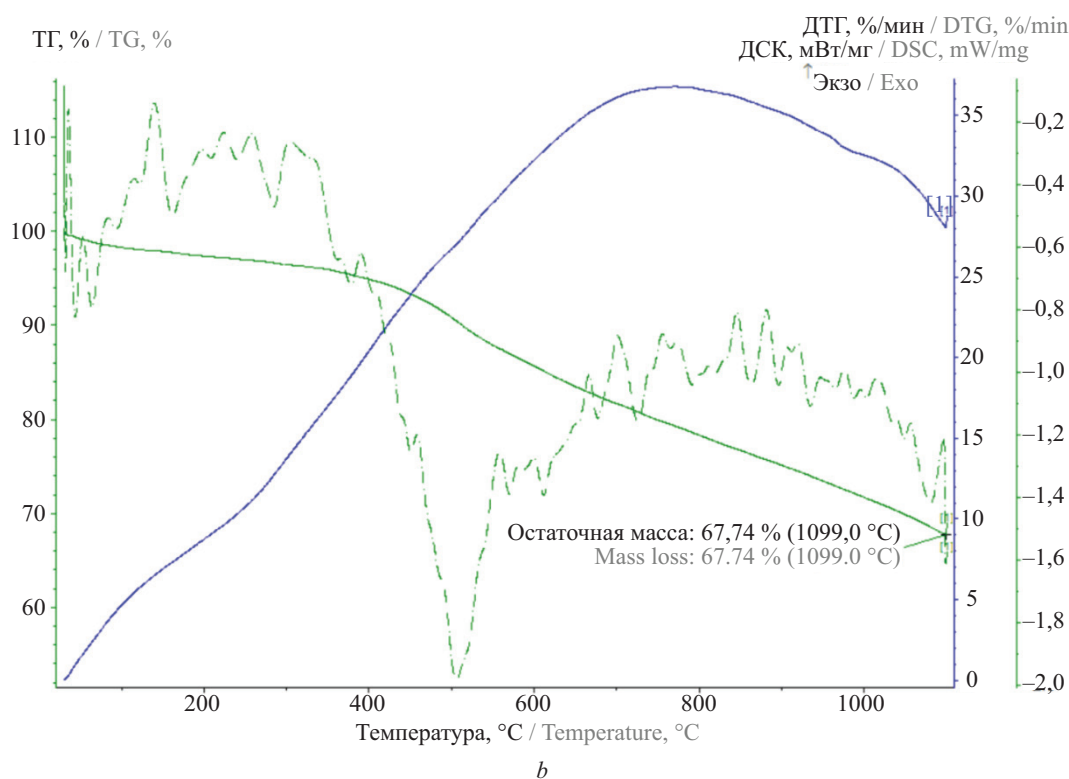


Рис. 3. Термограмма «красного» терриконика (а); «черного» терриконика (b)
 Fig. 3. Thermogram of self-ignited coal gangue (a); of not ignited coal gangue (b)

до полуводного. Эндотермический эффект в пределах температур 600–700 °С отражает диссоциацию карбоната магния, содержащегося в доломите, который в незначительных количествах (0,5 %) присутствует в пробе «красного» терриконика. Другой эндотермический эффект, наблюдающийся при температурах 1000–1100 °С, указывает на процесс разложения карбоната кальция, составляющего минерал кальцит [19–21].

Рассматривая термограмму «черного» терриконика (рис. 3, b), можно наблюдать следующие термоэффекты. Эндотермический эффект при температуре менее 100 °С связан с удалением из образца физически связанной воды. При 500 °С отмечается эндотермический эффект, связанный с дегидратацией каолинита с образованием метакаолинита [12], что подтверждает возможность использования этого материала в качестве активной минеральной добавки (АМД) в цементных системах.

Для того чтобы оценить эффективность использования террикоников в качестве МД в цементных системах, проведен эксперимент по замене части портландцемента в растворе в количестве 10, 20 и 30 % на тонкомолотый «красный» и обожженный «черный» терриконик. Результаты определения прочности на изгиб и сжатие образцов раствора представлены на рис. 4.

Результаты показали, что при добавлении 10 и 20 % «красного» терриконика прочность при сжатии образцов раствора находится примерно на том же

уровне, что и прочность образцов контрольного состава, с незначительным снижением, а при добавлении 30 % терриконика результаты испытаний оказались даже несколько выше контрольных.

Если определить индекс эффективности добавки как отношение предела прочности при сжатии образцов с добавкой к пределу прочности при сжатии образцов без добавки, то для состава с 30%-ной заменой цемента «красным» террикоником получим значение 1,06.

При добавлении в состав цементно-песчаного раствора 10, 20 и 30 % обожженного «черного» терриконика прочность при сжатии ЦК возрастает, несколько снижаясь при 30 % по сравнению с составом при 20%-ном расходе добавки. Оптимальным содержанием обожженного «черного» терриконика по прочности на сжатие можно считать 20 %, при котором прочность на сжатие увеличивается на 21 %. Индекс эффективности для состава с 20%-ной заменой цемента «черным» обожженным террикоником составил 1,21. Увеличение прочности раствора с обожженным «черным» террикоником может быть объяснено пуццоланической активностью метакаолинита. Продукты взаимодействия метакаолинита с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (C-(A)-S-H, стратлингит, гидрогранат [22]) заполняют пространство вокруг зерен заполнителя более плотно по сравнению с частицами цемента, также снижая капиллярную пористость [18].

Наличие значительного количества угля (31–35 %) в «черном» терриконике, с одной стороны,

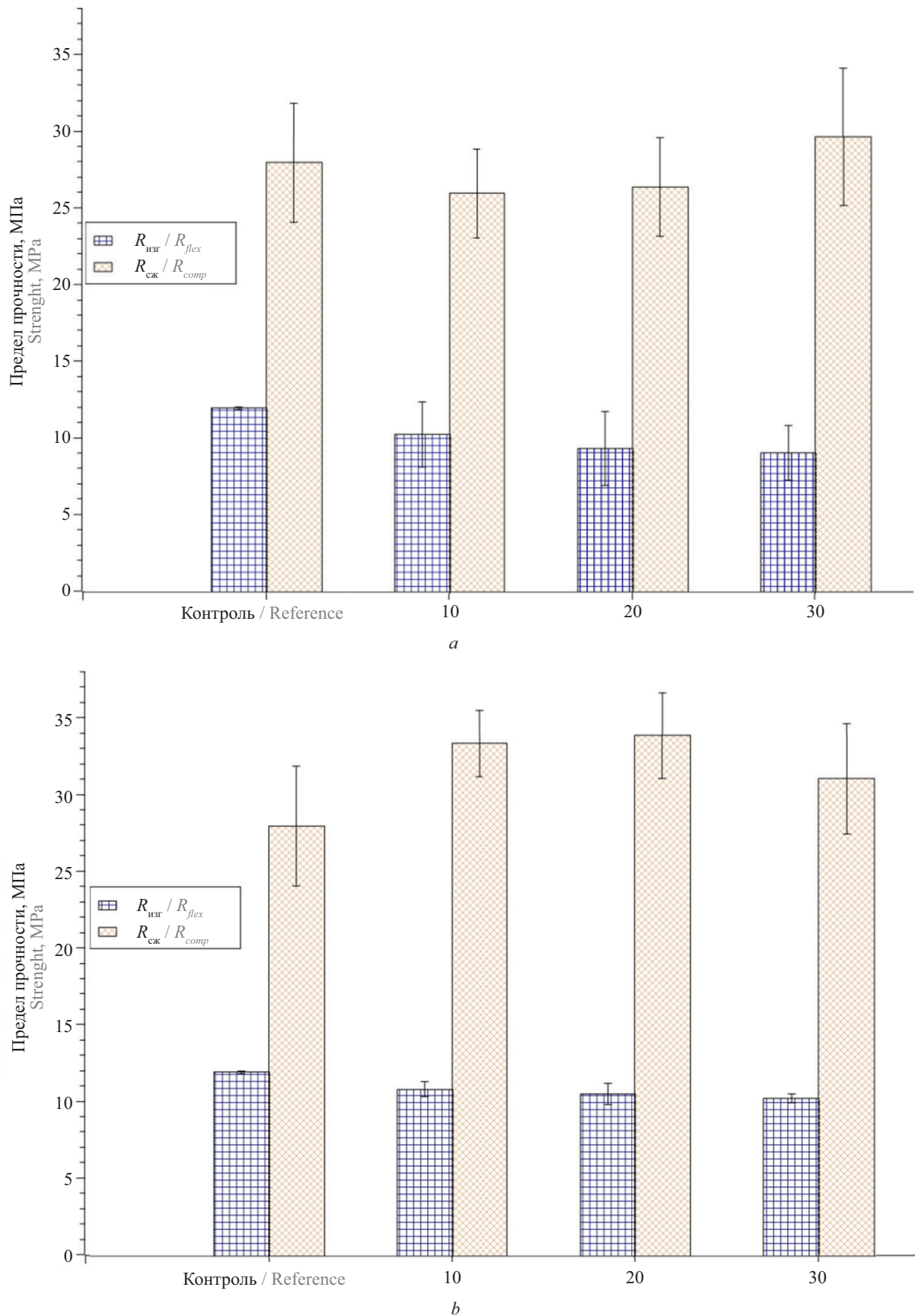


Рис. 4. Пределы прочности при изгибе и сжатии образцов раствора в возрасте 28 сут нормального твердения с добавкой 10, 20 и 30 % «красного» терриконика (а); обожженного «черного» терриконика (б)

Fig. 4. Flexural and compressive strength of mortar with 10, 20 and 30 % of self-ignited coal gangue admixture after 28 days of normal curing (a); of not ignited coal gangue (b)

является вредной примесью, однако этот компонент будет выгорать при термической активации добавки, что может быть рассмотрено как преимущество с точки зрения экономии топлива в процессе обжига [23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные результаты подтверждают возможность и эффективность использования террикоников Кизеловского угольного бассейна в качестве МД в цементных системах. Данный вывод сделан на основе следующих положений:

- химический и минералогический состав «красного» терриконика, состоящего в основном из кварца, дает основание для использования его в качестве МД;
- наличие в «черном» терриконике значительного (41 %) содержания каолинита дает основание для получения в результате обжига АМД метакаолинита, что подтверждается результатами термогравиметрического анализа;
- возможна замена цемента на тонкомолотый «красный» терриконик до 30 % без существенной потери прочности;
- также возможна замена цемента на тонкомолотый «черный» обожженный терриконик с увеличением прочности на сжатие в возрасте 28 сут на 21 % при 20%-ной замене цемента.

Наиболее перспективным с точки зрения эффективности применения в составе композиционных

портландцементных вяжущих видом террикоников являются негорелые породы, так как их последующие измельчение и термообработка будут способствовать усреднению состава и нивелированию влияния вредных примесей, в отличие от горелых пород, усреднение состава которых может потребовать больших затрат на их обогащение.

Целью дальнейших исследований станет оценка однородности химического и минералогического составов террикоников как во всем объеме исходного отвала, так и сродство составов отходов других отвалов Кизеловского угольного бассейна.

Для количественной оценки пуццоланической активности террикоников планируется проведение испытаний исследуемых добавок по методике ГОСТ Р 56593-2015, основанной на измерении количества извести, поглощаемой из насыщенного раствора добавкой. Данный метод планируется применять и для выявления зависимости пуццоланической активности «черного» терриконика от режима его термической активации, а также для сравнения активности террикоников с активностью широко используемых в технологии строительных материалов МД, например метакаолинита. Кроме того, необходимо детально изучить продукты совместной гидратации цемента и террикоников, а также рассмотреть вопросы эффективности совместного применения рассматриваемых композиционных цементных вяжущих и эффективных пластифицирующих добавок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kanagaraj B., Anand N., Samuvel Raj R., Lubloy E. Techno-socio-economic Aspects of Portland Cement, Geopolymer, and Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Composite Systems : A-State-of-Art-Review // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 398. P. 132484. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132484
2. Nahirwa D., Zmatou H., Lenormand H., Leblanc N. The Role of Supplementary Cementitious Materials in Hydration, Durability and Shrinkage of Cement-Based Materials, their Environmental and Economic Benefits : a Review // Cleaner Materials. 2022. Vol. 5. P. 100123. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100123
3. Wang A., Pan Y., Zhao J., Liu P., Wang Y., Chu Y. et al. Research Progress of Resourceful and Efficient Utilization of Coal Gangue in the Field of Building Materials // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 99. P. 111526. DOI: 10.1016/j.job.2024.111526
4. Баталин Б.С., Южаков К.Н., Белозерова Т.А. Техногенные месторождения минерального сырья для строительных материалов в Пермском крае : монография. Одесса, 2014. 281 с. EDN STOSYV.
5. Баталин Б.С., Белозерова Т.А., Маховер С.Э., Гайдай М.Ф. Кирпич сухого прессования из террико-

- ников Кизела // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2010. № 15 (191). С. 39–41. EDN MNJOKV.
6. Баталин Б.С., Белозерова Т.А., Гайдай М.Ф., Маховер С.Э. Керамический кирпич из террикоников Кизеловского угольного бассейна // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2012. № 11 (166). С. 18–22. EDN SKDXUF.
7. Баталин Б.С., Белозерова Т.А., Гайдай М.Ф. Строительная керамика из террикоников Кизеловского угольного бассейна // Стекло и керамика. 2014. № 3. С. 8–10. EDN RYHNSZ.
8. Баталин Б.С., Хорошавина А.И. Исследование возможности получения низкомарочного вяжущего вещества на основе горных пород шахтных террикоников // Master's Journal. 2013. № 2. С. 137–142. EDN RVZZOR.
9. Zhang Y., Ling T.C. Reactivity Activation of Waste Coal Gangue and its Impact on the Properties of Cement-Based Materials : a Review // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 234. P. 117424. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117424
10. Zhang J., Han H., Wang L. Pozzolanic Activity Experimental Dataset of Calcined Coal Gangue // Data

in Brief. 2023. Vol. 51. P. 109802. DOI: 10.1016/j.dib.2023.109802

11. Zhu Z., Liu Ch., Mao L., Han Z., Chen L., Zou H. et al. Study on the Effect of Activated Coal Gangue on the Mechanical and Hydration Properties of Cement // *Frontiers in Materials*. 2023. Vol. 10. P. 1186055. DOI: 10.3389/fmats.2023.1186055

12. Cao Z., Cao Y., Dong H., Zhang J., Sun C. Effect of calcination condition on the microstructure and pozzolanic activity of calcined coal gangue // *International Journal of Mineral Processing*. 2016. Vol. 146. Pp. 23–28. DOI: 10.1016/j.minpro.2015.11.008

13. Гамалий Е.А. Горелые породы как активная минеральная добавка в бетон // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2008. № 25 (125). С. 22–27. EDN JWKAQH.

14. Qin L., Gao X. Properties of Coal Gangue-Portland Cement Mixture with Carbonation // *Fuel*. 2019. Vol. 245. Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.02.067

15. Леонтьев С.В., Талейко А.А. Перспективы использования техногенных горных пород и кристаллических загравок в технологии LC3 вяжущих // *Construction and Geotechnics*. 2024. Т. 15. № 2. С. 31–48. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.2.03. EDN NVJPDH.

16. Zhang J., Chen T., Gao X. Incorporation of Self-ignited Coal Gangue in Steam Cured Precast Concrete // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 292. P. 126004. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126004

17. Cong X.Y., Lu S., Yao Y., Wang Z. Fabrication and Characterization of Self-ignition Coal Gangue Autoclaved Aerated Concrete // *Materials & Design*. 2016. Vol. 97. Pp. 155–162. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.02.068

18. Брыков А.С. Химические факторы коррозии портландцементных бетонов. СПб., 2016. 165 с.

19. Zhang W., Zhou H., Hu Y., Wang J., Ma J., Jiang R. et al. Influence of Curing Temperature on the Performance of Calcined Coal Gangue–Limestone Blended Cements // *Materials*. 2024. Vol. 17. Issue 8. P. 1721. DOI: 10.3390/ma17081721

20. Li D., Song X., Gong C., Pan Z. Research on cementitious behavior and mechanism of pozzolanic cement with coal gangue // *Cement and Concrete Research*. 2006. Vol. 36. Issue 9. Pp. 1752–1759. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.11.004

21. Гориков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. М. : Высш. школа, 1981. 335 с.

22. Weise K., Ukrainczyk N., Koenders E. Pozzolanic Reactions of Metakaolin with Calcium Hydroxide : Review on Hydrate Phase Formations and Effect of Alkali Hydroxides, Carbonates and Sulfates // *Materials & Design*. 2023. Vol. 231. P. 112062. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.112062

23. Рязанов А.А. Энергоэффективная технология известково-глинистого цемента и стеновых камней на основе отходов угледобычи : дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2021. 223 с.

Поступила в редакцию 9 февраля 2025 г.

Принята в доработанном виде 18 февраля 2025 г.

Одобрена для публикации 24 марта 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Андрей Алексеевич Талейко** — аспирант кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)**; 614000, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29; РИНЦ ID: 1221611, Scopus: 58204751900, ORCID: 0009-0006-9470-1220; taleyko.99@mail.ru;

Степан Васильевич Леонтьев — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)**; 614000, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29; РИНЦ ID: 704103, Scopus: 57193724081, ORCID: 0000-0002-0659-3324; n1306cl@yandex.ru.

Вклад авторов:

Талейко А.А. — идея, литературный обзор, проведение экспериментов, написание рукописи, анализ результатов.

Леонтьев С.В. — научное руководство, анализ результатов, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kanagaraj B., Anand N., Samuvel Raj R., Lubloy E. Techno-socio-economic Aspects of Portland Cement, Geopolymer, and Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Composite Systems : A-State-of-Art-Review. *Construction and Building Materials*. 2023; 398:132484. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132484

2. Ndahirwa D., Zmamou H., Lenormand H., Leblanc N. The Role of Supplementary Cementitious Materials in Hydration, Durability and Shrinkage of Cement-Based Materials, their Environmental and Economic Benefits : a Review. *Cleaner Materials*. 2022; 5:100123. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100123

3. Wang A., Pan Y., Zhao J., Liu P., Wang Y., Chu Y. et al. Research Progress of Resourceful and Efficient Utilization of Coal Gangue in the Field of Building Materials. *Journal of Building Engineering*. 2024; 99:111526. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.111526
4. Batalin B.S., Yuzhakov K.N., Belozerova T.A. *Technogenic deposits of mineral raw materials for building materials in the Perm region : monograph*. Odessa, 2014; 281. EDN STOSYV. (rus.).
5. Batalin B.S., Belozyorova T.A., Makhover S.E., Gaidai M.F. Dry-pressed brick made from Kizel waste pile. *Bulletin of SUSU. Series: Construction Engineering and Architecture*. 2010; 15(191):39-41. EDN MNJOKV. (rus.).
6. Batalin B.S., Belozerova T.A., Gayday M.F., Makhover S.E. Ceramic bricks from the thermal cores of the Kizelovsky coal basin. *Construction materials, equipment, technologies of the 21st century*. 2012; 11(166):18-22. EDN SKDXUF. (rus.).
7. Batalin B.S., Belozerova T.A., Gayday M.F. Construction ceramics from the thermal ceramics of the Kizelovsky coal basin. *Glass and Ceramics*. 2014; 3:8-10. EDN RYHNSZ. (rus.).
8. Batalin B.S., Khoroshavina A.I. Study of the possibility of obtaining a low-grade binder based on rocks from mine waste heaps. *Master's Journal*. 2013; 2:137-142. EDN RVZZOR. (rus.).
9. Zhang Y., Ling T.C. Reactivity Activation of Waste Coal Gangue and its Impact on the Properties of Cement-Based Materials : a Review. *Construction and Building Materials*. 2020; 234:117424. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117424
10. Zhang J., Han H., Wang L. Pozzolanic Activity Experimental Dataset of Calcined Coal Gangue. *Data in Brief*. 2023; 51:109802. DOI: 10.1016/j.dib.2023.109802
11. Zhu Z., Liu Ch., Mao L., Han Z., Chen L., Zou H. et al. Study on the Effect of Activated Coal Gangue on the Mechanical and Hydration Properties of Cement. *Frontiers in Materials*. 2023; 10:1186055. DOI: 10.3389/fmats.2023.1186055
12. Cao Z., Cao Y., Dong H., Zhang J., Sun C. Effect of calcination condition on the microstructure and pozzolanic activity of calcined coal gangue. *International Journal of Mineral Processing*. 2016; 146:23-28. DOI: 10.1016/j.minpro.2015.11.008
13. Gamaliy E.A. Burnt rocks as an active mineral admixture to concrete. *Bulletin of SUSU. Series: Construction Engineering and Architecture*. 2008; 25(125):22-27. EDN JWKAQH. (rus.).
14. Qin L., Gao X. Properties of Coal Gangue-Portland Cement Mixture with Carbonation. *Fuel*. 2019; 245:1-12. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.02.067
15. Leontev S.V., Taleiko A.A. Prospects for the use of man-made rocks and crystalline seeds in LC3 binder technology. *Construction and Geotechnics*. 2024; 15(2):31-48. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.2.03. EDN NVJPDH. (rus.).
16. Zhang J., Chen T., Gao X. Incorporation of Self-ignited Coal Gangue in Steam Cured Precast Concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 292:126004. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126004
17. Cong X.Y., Lu S., Yao Y., Wang Z. Fabrication and Characterization of Self-ignition Coal Gangue Autoclaved Aerated Concrete. *Materials & Design*. 2016; 97:155-162. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.02.068
18. Brykov A.S. *Chemical factors of corrosion of Portland cement concretes*. St. Petersburg, 2016; 165. (rus.).
19. Zhang W., Zhou H., Hu Y., Wang J., Ma J., Jiang R. et al. Influence of Curing Temperature on the Performance of Calcined Coal Gangue–Limestone Blended Cements. *Materials*. 2024; 17(8):1721. DOI: 10.3390/ma17081721
20. Li D., Song X., Gong C., Pan Z. Research on cementitious behavior and mechanism of pozzolanic cement with coal gangue. *Cement and Concrete Research*. 2006; 36(9):1752-1759. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.11.004
21. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savel'ev V.G. *Methods of physico-chemical analysis of binders*. Moscow, Higher school, 1981; 335. (rus.).
22. Weise K., Ukrainczyk N., Koenders E. Pozzolanic Reactions of Metakaolin with Calcium Hydroxide : Review on Hydrate Phase Formations and Effect of Alkali Hydroxides, Carbonates and Sulfates. *Materials & Design*. 2023; 231:112062. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.112062
23. Ryazanov A.A. *Energy-efficient technology of lime-clay cement and wall stones based on coal mining waste : PhD Thesis*. Ufa, 2021; 223. (rus.).

Received February 9, 2025.

Adopted in revised form on February 18, 2025.

Approved for publication on March 24, 2025.

BIONOTES: **Andrei A. Taleiko** — postgraduate student of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614000, Russian Federation; ID RSCI: 1221611, Scopus: 58204751900, ORCID: 0009-0006-9470-1220; taleiko.99@mail.ru;

Stepan V. Leontev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614000, Russian Federation; ID RSCI: 704103, Scopus: 57193724081, ORCID: 0000-0002-0659-3324; n1306cl@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Andrei A. Taleiko — idea, literature review, data gathering and processing, writing of the article, results analysis.

Stepan V. Leontev — supervision, results analysis, scientific editing of the text.

The authors declare no conflicting interests.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 332.872

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.932-940

Проблемы эксплуатации малоэтажной жилой застройки и пути их решения

Леонид Николаевич Чернышов, Алексей Григорьевич Калгушкин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Качество жизни связано с комфортом и безопасностью нахождения человека в квартире многоквартирного дома (МКД) или помещениях загородного дома. Устойчиво сложившаяся в последние годы практика низкого уровня жилищно-коммунального обслуживания в МКД изменила предпочтения большей части населения России в выборе условий проживания. Это привело к снижению высотного строительства в пользу строительства индивидуальных жилых домов. При этом культура, а также организация строительства и эксплуатация загородных жилых поселков оказалась не до конца отрегулирована в нормативно-правовом плане. Наряду с явными преимуществами индивидуального жилого дома в коттеджных поселках и садовых некоммерческих товариществах возникают вопросы экономических отношений между собственниками частных домов в части эксплуатации общего имущества. Цель исследования — анализ факторов, влияющих на организацию и осуществление эксплуатации загородных коттеджных поселков.

Материалы и методы. При современном уровне развития технологий удобства, свойственные городской квартире, сегодня можно обеспечить в любой местности, благодаря новым строительным материалам, автономным источникам теплоснабжения, локальным очистным сооружениям и оборудованию. Использованы данные статистики, методы анализа и сравнения.

Результаты. Уровень инженерного благоустройства коттеджных поселков, который свидетельствует об их категории (эконом-, бизнес-, премиум-класса), с одной стороны, является привлекательным для владельцев частных домов, с другой — в условиях отсутствия законодательного регулирования вопросов управления общим имуществом в коттеджных поселках, несоответствия целевого назначения садовых товариществ в будущем оборачивается проблемами при организации их эксплуатации. Введение нормативно-правового регулирования позволит снять спорные вопросы, возникающие при эксплуатации коттеджных поселков и садовых товариществ, повысить качество жизни их жителей.

Выводы. Законодательное установление статуса коттеджных поселков, состава общего имущества таких жилых комплексов даст возможность избежать конфликтных ситуаций, обеспечить комфортное и безопасное проживание жителей коттеджных поселков, определить источники финансирования работ по эксплуатации общего имущества.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высотное строительство, индивидуальный жилой дом, эксплуатация, общее имущество, коттеджный поселок, коммунальная инфраструктура

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чернышов Л.Н., Калгушкин А.Г. Проблемы эксплуатации малоэтажной жилой застройки и пути их решения // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 6. С. 932–940. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.932-940

Автор, ответственный за переписку: Леонид Николаевич Чернышов, leo.chern@yandex.ru.

Problems of low-floor housing operation and ways to solve them

Leonid N. Chernyshov, Alexey G. Kalguskin

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

ABSTRACT

Introduction. The quality of life is inextricably linked with the comfort and safety of a person's stay in an apartment of an apartment building or the premises of a country house, where he "spends" most of the time. The practice of a low level of housing and communal services in apartment building, which has been steadily established in recent years, has changed the preferences of the majority of the Russian population in choosing living conditions. This has led to a decrease in high-rise construction in favour of the construction of individual residential buildings. At the same time, the culture, as well as the organization of construction and operation of suburban residential villages, turned out to be not fully regulated in the normative and legal terms. In addition, along with the obvious advantages of an individual residential building in cottage villages and garden non-profit partnerships, issues of economic relations between owners of private houses, in terms of the operation of common property, also remain unresolved. The purpose of the study is to analyze the factors influencing the organization and implementation of the operation of suburban cottage villages.

Materials and methods. With the current level of technological development, the conveniences inherent in a city apartment can now be provided in any area, thanks to new building materials, autonomous heat sources, local treatment facilities and equipment. The work uses statistical data, the method of analysis and comparison.

Results. The level of engineering improvement of cottage villages, which indicates their category (economy, business, premium class), on the one hand, is attractive to owners of private houses, and on the other hand, in the absence of legislative regulation of issues of managing common property in cottage villages, the discrepancy between the intended purpose of garden associations in the future will result in significant problems in organizing their operation. The introduction of legal regulation will allow to remove controversial issues arising during the operation of cottage villages and garden associations, and improve the quality of life of their residents.

Conclusions. Legislative definition of the status of cottage villages, the composition of the common property of such residential complexes, will help to avoid conflict situations, ensure comfortable and safe living for residents of cottage villages, and determine sources of financing for the operation of common property.

KEYWORDS: high-rise construction, individual residential building, operation, common property, cottage village, communal infrastructure

FOR CITATION: Chernyshov L.N., Kalgushkin A.G. Problems of low-floor housing operation and ways to solve them. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(6):932-940. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.932-940 (rus.).

Corresponding author: Leonid N. Chernyshov, leo.chern@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Социально-гармонизированное развитие государства невозможно без устойчивой и эффективной эксплуатации созданных (построенных) объектов капитального строительства (ОКС), обеспечивающих благоприятные условия для интеллектуального совершенствования, труда и отдыха человека в обществе.

Комфорт и безопасность при нахождении в жилой застройке лежат в основе причинно-следственных связей, формирующихся у человека на бытовом уровне, благодаря которым удовлетворенность жизнью наступает тогда, когда реальность совпадает с его запросами.

В то же время сегодня на местах реальность переполнена негативным восприятием населения качеством жилищно-коммунальных услуг в многоквартирных домах (МКД), которая подтверждается ежегодными опросами ВЦИОМ и обращениями в адрес главы государства при подготовке его прямой линии общения с гражданами страны.

«Лучшие практики» управления МКД, которые демонстрируются на различных публичных мероприятиях (форумах, конференциях и др.), считающиеся важными и успешными для управляющих организаций, представляются второстепенными и даже неприемлемыми для основной массы квартировладельцев в многоквартирных домах [1]. Из-за этого у горожан возникает потребность поиска вариантов иного уклада жизни, позволяющего выйти за пределы воздействия города и предписываемого им образа жизни.

Людам свойственно сравнивать себя с благополучными, обеспеченными современниками, а не с неудачниками. Отсюда, помимо генетической потребности жить ближе к природе, доставшейся нам от наших предков охотников и собирателей, 66 % домохозяйств, согласно исследованиям «ДОМ. РФ», считают частный дом предпочтительным ви-

дом жилья, еще 14 % сограждан готовы время от времени арендовать загородные дома [2, 3].

Это свидетельствует и о том, что чем выше качество жизни, тем больше запросы человека. Улучшение жилищных условий в последние десятилетия для миллиона россиян оборачивается не повышением удовлетворенности от полученных благ, а ростом их потребности.

Согласно данным Росстата, из 14,5 млн домов 12,3 млн — это частные дома малоэтажной застройки, расположенные в пригородных и коттеджных поселках, садовых и дачных кооперативах, которые представлены: индивидуальными домами на одну семью; сблокированными жилыми домами (таунхаусы, дуплексы); многоквартирными домами высотой не более трех этажей, для строительства которых не требуется прохождение государственной экспертизы проектов.

При этом, как отмечает академик архитектуры А.С. Кривов, из 1723,41 млн га территории Российской Федерации площадь, занятая населенными пунктами, составляет всего 19,5 млн га или 1,14 %, а жилая застройка насчитывает порядка 3,7 млн га, создавая таким образом высокую плотность населения¹, что не соответствует современным глобальным вызовам, безопасности граждан и интересам государства [4, 5].

Данные статистики свидетельствуют о том, что в жилищной сфере России происходит стихийное под воздействием пожелания людей коренное изменение общего тренда со стороны высотного строительства в пользу малоэтажного жилья, строительство которого в перспективе должно будет ре-

¹ Сегодня население страны сконцентрировано в основном в 1120 городах России (16 — крупнейших, 64 — крупных, 90 — больших, около 150 — средних и порядка 800 — малых) благодаря оттоку жителей из сельских поселений (за период с 1959 по 2024 г. число сельских поселений в России сократилось с 294,0 тыс. до 141 тыс.).

шить одну из ключевых проблем нашего отечества — демографическое воспроизводство населения [6, 7].

Маятниковая миграция жителей из пригородных поселков в городские зоны к месту работы и в обратном направлении в условиях массовой автомобилизации не пугает граждан, и стремление иметь собственный дом является одним из самых популярных желаний жителей крупных городов и мегаполисов.

Распространение технологий связи, прежде всего мобильной и интернета, позволило в значительной мере преодолеть информационную изолированность частного сектора. Кроме того, этому способствовал процесс компьютеризации, особенно непромышленных сфер деятельности, который сформировал новую форму организации и осуществления труда, позволяющего выполнять работу в удаленном (дистанционном) формате. Эти устремления населения к здоровому образу жизни находят отражения в программных документах государства.

Национальный проект «Жилье и городская среда»², основной целью которого было повышение стандартов и уровня жизни населения, а также Стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации до 2030 года с прогнозом до 2035 года способствуют:

- снижению себестоимости строительства малоэтажного жилья за счет внедрения новых более экономичных технологий строительства и производства основных комплектующих строительных материалов;
- внедрению мер государственной, в том числе правовой и финансовой, поддержки застройщиков, включающих льготное ипотечное кредитование индивидуального жилищного строительства (ИЖС)³ и использование эскроу-счетов;
- разработке типовых проектов индивидуальных жилых домов и объектов социальной инфраструктуры;
- стимулированию производства современных строительных материалов и энергоэффективного тепло- и электротехнического оборудования для малоэтажного жилья.

В рамках реализации этих программных документов обеспечения объектами инженерной инфра-

² На смену национальному проекту «Жилье и городская среда», который действовал до 01.01.2025 г., «пришел» новый национальный проект «Инфраструктура для жизни», целью которого является обеспечения граждан социально значимой инфраструктурой нового качества.

³ Словосочетание индивидуальное жилищное строительство и аббревиатура ИЖС с юридической точки зрения обозначают вид разрешенного использования земельного участка (ВРИ). Он определяет назначение земли и используется в документах по планированию территории. Такие земли предназначены для строительства капитальных жилых домов.

структуры земельных участков, предназначенных для ИЖС, на местах осуществляется в соответствии с региональными программами социального и экономического развития населенных пунктов и согласно требованиям Федерального закона «Об общих принципах организации публичной власти в субъектах Российской Федерации», где выделены отдельные полномочия органов государственной власти субъекта РФ, необходимая инженерная инфраструктура в сфере теплоснабжения, водоснабжения и газоснабжения.

Благодаря этому происходит комплексное освоение прилегающих к городской застройке территорий, где строятся индивидуальные жилые дома и большие поселки. По информации Минстроя России, в 2024 г. из общего объема введенного жилья более 60 % это объекты ИЖС, что свидетельствует об имеющих место процессах развития пригородных территорий или субурбанизации [8].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования показывают, что причины субурбанизации кроются не только в особенностях и сложностях проживания населения в высокоурбанизированных поселениях, обусловленных зависимостью (включающей неопределенность) от управляющих и ресурсоснабжающих организаций, не гарантирующих своевременного и качественного предоставления жилищно-коммунальных услуг, но и в стоимости возведения индивидуальных жилых домов, которая в соответствии с общепринятой практикой продаж в разы меньше стоимости квартиры в МКД.

На этом фоне наблюдается стремление жителей крупных и средних городов к строительству на землях ИЖС или к приобретению второго жилья в коттеджных поселках, садовых и дачных товариществах. Исходя из этого, при рассмотрении проблем эксплуатации территорий и объектов малоэтажной застройки следует учитывать особенности организации их создания и функционирования [9, 10].

Строительство частных домов в загородных поселках с архитектурно-планировочной точки зрения хотя и регламентируется сегодня СП 42.13330.2016 «Планировка и застройка городских и сельских поселений» и СП 30-102-99 «Планировка и застройка территорий малоэтажного жилищного строительства», но как показывает практика, осуществляется хаотично и бесконтрольно [11, 12].

Из-за отсутствия баланса полномочий и персональной ответственности специалистов в области инженерных изысканий, архитектурно-строительного проектирования и строительства, участвующих в создании объектов малоэтажного строительства и их эксплуатации, на практике отмечаются:

- недостоверные данные инженерно-геологических изысканий;

- нарушение норм размещения объектов на участках коттеджного строительства;
- нарушение правил прокладки и устройства инженерных сетей и коммуникаций;
- несоблюдение технологии устройства тротуаров и дорожного покрытия;
- низкий уровень качества эксплуатации общего имущества коттеджных поселков и другие проблемы, которые в конечном итоге оказывают влияние на комфорт и безопасность проживающих в таких поселках.

Тем не менее рассматриваемые дома обладают рядом безусловных преимуществ, к числу которых относится и то, что они создаются с учетом вкусов и предпочтений будущего владельца, как одежда, по размеру, стилю, инженерному обустройству. Не последнюю роль играет и то, что современные технологии позволяют обеспечить комфорт и удобства в загородном доме практически в любой местности вне зависимости от удаленности от централизованных инженерных коммуникаций, т.е. полное благоустройство жилья происходит при сохранении значительной автономности от городской инженерной инфраструктуры [13].

Функциональность здесь сочетается с удовлетворением запроса на более просторное и качественное жилье, а также новую архитектурную экологию и эстетику жизненного комфорта. Ее символами становятся: жилая площадь в среднем до 70–80 м² на человека, внедрение элементов локального инженерного благоустройства жилья (системы водоотведения, водоснабжения, отопления), новые строительные материалы.

Как только человек задумался о строительстве загородного дома, в его сознании возникают четыре слова — свет, газ, вода, канализация.

Источником водоснабжения в коттеджных поселках и садовых товариществах, удаленных от городской застройки, является, как правило, одна или несколько артезианских скважин, которые подают воду (ее состав должен соответствовать ГН 2.1.5.1316-03 «Ориентировочные допустимые уровни (ОДУ) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования») в накопительный резервуар (водонапорную башню). Перед подачей в систему хозяйственно-питьевого водоснабжения вода должна проходить через станции водоочистки, оснащенные соответствующим оборудованием, в зависимости от химического состава исходной воды, для доведения показателей до гигиенических нормативов. Такое оборудование может входить в инженерную инфраструктуру каждого индивидуального дома, а может быть общим для всего поселка.

Очистка хозяйственно-бытового стока на территориях индивидуальной жилой застройки, оборудованных централизованной системой канализации, осуществляется на станциях биологической очист-

ки. Состав и свойства сточных вод после очистки должны соответствовать требованиям СанПиН 2.1.5.980-00. 2.1.5. «Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. Санитарные правила и нормы». В современном исполнении вышеупомянутое оборудование имеет автоматизированные системы контроля и регулирования, что, с одной стороны, повышает его производительность, а с другой — требует обслуживания персоналом, имеющим определенную квалификацию.

Востребованным стало внедрение полностью или частично автоматизированных систем регулирования домового инженерного оборудования. Появление доступных газовых и электроотопительных котлов обеспечило владельцу частного дома возможность не только снизить расходы на эксплуатацию, но и по-новому организовать жилое пространство [14].

Технологии автоматического поддержания температуры в жилье, системы удаленного управления водонагревательными и отопительными системами в значительной мере позволили жителю частного сектора не только распоряжаться собственным вне-рабочим временем, но и быть более мобильным.

Обеспечение коттеджных поселков электричеством в требуемых объемах преследует задачу присоединения индивидуальных жилых домов к централизованной системе энергоснабжения. Комплектные трансформаторные подстанции выглядят как площадка с высоким ограждением, на территории которой устанавливается подстанция с одним или несколькими масляными трансформаторами в зависимости от максимальной потребляемой мощности объекта электроснабжения (коттеджного поселка). От подстанции пониженный потенциал напряжения разводится по домам потребителей.

Для газовых служб единственной проблемой устройства газопровода к загородным поселкам является малочисленность домохозяйств.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Уровень развития инфраструктуры зависит от класса поселка, количества жилых домов в нем и предусматривает комплекс сооружений и коммуникаций транспорта (дороги, тротуары, автостоянки), пожарной безопасности (водоемы и посты), связи (систему видеонаблюдения и контроля доступа), инженерного оборудования (электро- и газоснабжения, локального водоснабжения и водоотведения), а также объектов социального и культурно-бытового обслуживания населения (детские игровые и спортивные площадки, зоны отдыха, магазин продовольственных товаров), обеспечивающий устойчивое развитие и функционирование поселка.

Инфраструктура в загородных поселках индивидуальной жилой застройки составляет порядка

25–30 % себестоимости их строительства. В проектах загородных поселков бизнес-класса набор объектов инфраструктуры существенно шире. Добавляются, например, спортивные площадки, рестораны, детские клубы и оздоровительные комплексы [15, 16].

При этом строительство частного дома как собственными силами, так и посредством строительных компаний — процесс длительный и трудоемкий, таящий в себе множество «подводных камней», которые начинают проявляться только при эксплуатации малоэтажной застройки, причины которых начинают формироваться с момента приобретения земельного участка или дома в комплексе малоэтажной застройки.

Как правило, предметом продажи участков под застройку в составе коттеджного поселка являются земли, выведенные из оборота сельского хозяйства и принадлежащие единственному собственнику — юридическому или физическому лицу, находящиеся на удалении от городской и поселковой территории и зарегистрированные в соответствии с Федеральным законом «О государственной регистрации недвижимости».

Земля размежевывается на участки под застройку и места общего пользования для устройства объектов инфраструктуры (дорог, тротуаров, автостоянок, систем электро- и газоснабжения, ливневой и бытовой канализации, водозаборов, площадок для сбора твердых коммунальных отходов, элементов внешнего благоустройства и пожарной безопасности и др.).

Учитывая, что обязательные требования к разработке и согласованию проектной документации с органами местного самоуправления и соответствующими службами региональной власти в законодательстве отсутствуют, собственники земли не всегда соблюдают строительные и санитарные нормы и правила при устройстве этих объектов общего пользования (объектов инженерной и социальной инфраструктуры).

Это позволяет им производить работы без получения ордера на выполнение земляных работ и иной разрешительной документации, что в конечном итоге становится серьезной проблемой в будущем при организации и осуществлении эксплуатации этих объектов.

Продажа участков под застройку растягивается на годы. В этот период собственник, как правило, создает юридическое лицо (потребительский кооператив, товарищество собственников недвижимости или иные объединения собственников) со своим участием, на балансе которого учтены не только участки под застройку для продажи, но и все объекты общего пользования. Эффективное и безопасное функционирование общего имущества малоэтажной застройки требует грамотной эксплуатации — деятельности, направленной на сохранение проект-

ных характеристик в течение длительного периода времени.

Качество эксплуатации зависит от наличия:

- документов, исходно-разрешительных и регламентирующих деятельность по эксплуатации общего имущества малоэтажной застройки;
- персонала, обеспечивающего организацию, планирование и проведение соответствующих работ, требования к квалификации которого сегодня закреплены в профессиональных стандартах, утвержденных Минтрудом России.

На этапе продажи участков под застройку и/или поэтапного строительства и ввода в эксплуатацию индивидуальных жилых домов созданное юридическое лицо обеспечивает эксплуатацию инженерной инфраструктуры — систем жизнеобеспечения коттеджного поселка собственными силами (как правило, «на износ») или по договорам с ресурсоснабжающими организациями, гарантирующих поставку коммунальных ресурсов и услуг гражданам, которые уже заселились в свои дома [17].

Как только продан последний дом или участок, собственник выходит из состава созданного юридического лица, сохраняя за собой право владения общим имуществом коттеджного поселка, но прекращает финансировать его эксплуатацию.

Такая обязанность сохраняется у юридического лица при отсутствии законодательно закрепленной за ним обязанности соблюдения в таких поселках малоэтажной застройки правил пожарной и экологической безопасности, санитарных норм и инструментов регулирования вопросов организации эксплуатации общего имущества коттеджного поселка. С этого момента возникают проблемы как для проживающих в коттеджном поселке, так и для органов местного самоуправления.

Это связано с тем, что в законодательстве не определен статус коттеджного поселка как объекта прав проживающих в нем граждан по аналогии с многоквартирным домом. Из-за этого возникают проблемы юридического лица, которое приняло от собственника земельного участка функции управления коттеджным поселком по:

- взаимодействию с владельцами частных домов в части членства их в этом юридическом лице;
- статусу общего имущества (инженерной и социальной инфраструктуры);
- заключению договоров на оказание услуг по эксплуатации общего имущества;
- определению размера взносов на содержание общего имущества;
- обоснованности размера этих взносов и другим вопросам производственно-хозяйственной деятельности в коттеджном поселке.

Получение оплаты с лиц, не желающих становиться членами сообществ в таких поселках, становится проблематичным, что ведет к снижению

качества содержания инфраструктуры и в конечном итоге к обращению проживающих в органы власти.

Иная, но тоже проблематичная ситуация складывается в садовых некоммерческих товариществах и их предшественниках — дачных некоммерческих партнерствах. Исторически такие участки выделялись на землях сельскохозяйственного назначения для производства гражданами сельскохозяйственной продукции для личных нужд и летнего отдыха. Строительство капитальных жилых домов на этих территориях не планировалось, как правило все ограничивалось постройкой летних домиков и хозяйственных построек, не имевших признаков ОКС. При разработке проектов планировки таких садоводческих товариществ, как правило, исходили из того, чтобы обеспечить максимальное количество земельных участков [18, 19].

Законодательство и в настоящее время не обязывает такие товарищества согласовывать проекты планировки ни с органами местного самоуправления, ни с иными органами исполнительной власти. Отсюда дорожно-тротуарная сеть и инженерная инфраструктура устраивались на этих участках исходя из увеличения количества домохозяйств:

- дороги не имели твердого покрытия;
- водопровод создавался из расчета пользования им в теплое время года;
- воздушные линии электропередачи и освещение улиц строились исходя из минимальных затрат.

Однако с течением времени ситуация в садовых некоммерческих товариществах (СНТ) изменилась. На территориях садовых товариществ сейчас возводятся капитальные жилые дома с водоснабжением от скважины, локальной системой хозяйственно-бытовой канализации, которые требуют большего энергопотребления. Ключевыми характеристиками таких домов становятся их полное благоустройство с высокой степенью автономности и значительная или полная утрата придомовой территории для обеспечения продуктами питания. Эти изменения породили среди владельцев домов в СНТ ряд новых проблем:

1. «Расслоение» членов садоводческих товариществ по форме использования принадлежащего им дачного участка:

- одни продолжают использовать участок с целью производства сельскохозяйственной продукции для личных нужд и летнего отдыха;
- другие для постоянного проживания и/или комфортного времяпровождения.

И если первым достаточно поддерживать инфраструктуру дачного товарищества на прежнем уровне, то вторым необходима модернизация сетей электроснабжения, устройство дорог с твердым покрытием, а в идеале создание новой инженерной и социальной инфраструктуры.

2. Разногласия между членами садоводческих товариществ, связанные с эксплуатацией инженер-

ных сетей и общего имущества таких поселков. Несмотря на ранее урегулированные Федеральным законом «О ведении гражданами садоводства и огородничества для собственных нужд и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» отношения в части определения состава общего имущества СНТ, порядка оплаты его содержания, в сложившейся обстановке требуются дополнительные меры законодательного регулирования этих вопросов [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая растущую популярность малоэтажного строительства в среде строительных организаций, возрастающий интерес граждан к данной форме жилых образований, а также в целях снижения экологических и криминальных проблем, связанных со строительством и функционированием объектов малоэтажной застройки, необходимо законодательно закрепить:

- статус коттеджных поселков как малоэтажных жилых комплексов, объединенных общей инфраструктурой, с определенными границами земельных участков;
- порядок регулирования отношений между собственниками односемейных жилых домов в таких поселках, застройщиками и эксплуатирующими/управляющими организациями;
- порядок установления общего имущества коттеджных поселков с целью исключения неоднозначности при определении состава имущества, сроков перехода имущества застройщика (собственника земельного участка) в состав общего имущества, исключения возможности злоупотребления застройщиком своими правами;
- требования к организации и процедуре привлечения ее для эксплуатации/управления коттеджным поселком;
- порядок формирования и утверждения минимального перечня работ и услуг по обслуживанию коттеджных поселков и требования к предоставлению коммунальных ресурсов и услуг;
- порядок формирования и утверждения размера платы за содержание общего имущества коттеджных поселков, а также стандартов эффективной эксплуатации общего имущества объектов индивидуальной жилищной застройки и методов их контроля.

В банковской сфере необходимо сформировать продукты ипотечного кредитования строительства малоэтажного жилья с использованием механизмов поддержки, установленных государственными программами, как для ИЖС, строящегося гражданами хозяйственным способом, так и для молодежных жилых комплексов, возводимых застройщиками [21].

Принимая во внимание различные формы организации строительства частных жилых домов в та-

ких поселках, требуется создать условия для формирования единой системы правового регулирования градостроительной деятельности на всех этапах жизненного цикла объектов ИЖС — изыскания, проектирование, строительство, эксплуатация в рамках действующего института саморегулирования в строительной отрасли путем внесения соответствующих изменений в Градостроительный кодекс.

Такие решения дадут возможность предотвратить необоснованные затраты бюджетов муниципальных образований на содержание имущества, созданного застройщиком на территории малоэтажной застройки, которое органы муниципальной власти вынуждены принимать ввиду возникающей

социальной напряженности на территории из-за неэффективной их эксплуатации, а также преждевременный износ имущества коттеджных поселков.

Наличие организации, ответственной за эксплуатацию коттеджных поселков (аналога управляющей организации), позволит сделать прозрачной для контрольно-надзорных органов эксплуатацию скважин, систем водоотведения, обеспечение надлежащей эксплуатации газопроводов и сетей электроснабжения, линий наружного освещения за счет наличия в таких организациях квалифицированного персонала и, как следствие, обеспечить комфортное и безопасное проживание жителей в данных поселках в течение длительного времени [22].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чернышов Л.Н., Ивчик Т.А., Колгушкин А.Г. Особенности функционирования многоквартирных зданий на эксплуатационном этапе жизненного цикла // Экономика строительства. 2024. № 9. С. 343–347. EDN APJGKC.
2. Азорин М.Ю. Внедрение концепции единого оператора комплексного развития территорий на базе финансового института развития жилищного строительства АО «ДОМ.РФ» // Известия Байкальского государственного университета. 2023. Т. 33. № 4. С. 744–754. DOI: 10.17150/2500-2759.2023.33(4).744-754. EDN TIGFTV.
3. Ibadov N., Ladnykh I., Farzaliyev S. Selection of technological and organizational solutions for construction works with the use of a fuzzy relation of preferences // Archives of Civil Engineering. 2023. DOI: 10.24425/ace.2023.147677
4. Кривов А.С. Градостроительство России: образы будущего // Вестник НОПРИЗ. 2024. № 3 (18). С. 20–30.
5. Bradley A., Li H., Lark R., Dunn S. BIM for infrastructure : an overall review and constructor perspective // Automation in Construction. 2016. Vol. 71. Pp. 139–152. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.019
6. Елисеева И.И., Боченина М.В. Спрос на рынке жилья и потребности россиян: эконометрический подход // Экономическое возрождение России. 2022. № 4 (74). С. 41–56. DOI: 10.37930/1990-9780-2022-4-74-41-56. EDN YQDDWY.
7. Wong S.K., Chau K.W., Yau Y., Cheung A.K.C. Property price gradients: the vertical dimension // Journal of Housing and the Built Environment. 2011. Vol. 26. Issue 1. Pp. 33–45. DOI: 10.1007/s10901-010-9203-8
8. Гарнага А.Ф., Охотникова Ю.В., Громенко И.В., Тюкавкина И.Л., Савкова Н.В. Процессы субурбанизации в России и мире. Причины. Особенности // Социология. 2020. № 6. С. 84–87. EDN VAZTXC.
9. Виноградская О.Я. От чего горожане едут в деревню: феноменология и практика // Крестьяноведение. 2019. Т. 4. № 3. С. 140–155. DOI: 10.22394/2500-1809-2019-4-3-140-155. EDN LHQOPE.
10. Король Е.А., Журавлева А.А. Алгоритм выбора рациональных организационно-технологических решений при строительстве малоэтажных жилых зданий // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. № 7 (1007). С. 51–53. EDN XRSLFB.
11. Пахомова М.А., Храпцов А.Б. Малоэтажное строительство в России и за рубежом : обзор практик // Архитектура, строительство, транспорт. 2022. № 3. С. 20–31. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-3-20-31. EDN UMTSNC.
12. Baduge S.K., Thilakarathna S., Perera J.S., Arashpour M., Sharafi P., Teodosio B. et al. Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications // Automation in Construction. 2022. Vol. 141. P. 104440. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104440
13. Король Е.А., Журавлева А.А., Савин В.К. Организационно-технологическое моделирование возведения малоэтажных жилых зданий с учетом рационального энергопотребления // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2019. № 4 (382). С. 184–189. EDN RVFUUP.
14. Glass J., Bygballe L.E., Hall D. Transforming construction: the multi-scale challenges of changing and innovating in construction // Construction Management and Economics. 2022. Vol. 40. Issue 11–12. Pp. 855–864. DOI: 10.1080/01446193.2022.2141432
15. Мирошниченко Д.А., Воловник Н.С. Малоэтажное строительство, его роль и перспективы развития // Наука, технологии, инновации в мире глобальных трансформаций : мат. IX Междунар. науч.-практ. конф. 2021. С. 23–30. EDN TSYTPI.
16. Roston J.H., Kulejewski J.E. A hybrid approach for solving multi-mode resource-constrained

project scheduling problem in construction // *Open Engineering*. 2019. Vol. 9. Issue 1. Pp. 7–13. DOI: 10.1515/eng-2019-0006

17. *Зимин И.А.* Анализ актуальных законотворческих инициатив в области решения проблем управления общим имуществом на территории организованной малоэтажной жилой застройки // *Образование и право*. 2021. № 11. С. 116–124. DOI: 10.24412/2076-1503-2021-11-116-124. EDN PWEUOW.

18. *Лазаренко А.К.* Терра инкогнита или земли СНТ // *ЖКХЭксперт*. 2024. № 8. С. 20–23.

19. *Jaśkowski P., Biruk S., Krzemiński M.* Modeling the problem of sequencing projects in the contractor's portfolio of orders // *Archives of Civil Engineering*. 2022. Vol. 68. Issue 3. Pp. 307–322. DOI: 10.24425/ace.2022.141887

20. *Черезов В.В., Гузева И.В.* Проблемы становления земельных отношений при реализации «дачного» закона на землях сельскохозяйственного назначения и землях населенных пунктов // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2019. № 4. С. 28–32. DOI: 10.24411/2587-6740-2019-14060. EDN UCAOZD.

21. *Хомяков Д.А.* Закономерности развития и оптимизация роста столичных жилых пригородов // *Науковедение*. 2017. Т. 9. № 2. С. 103. EDN YPQJAP.

22. *Чернышов Л.Н.* Организационно-технические и методические предпосылки профессиональной трансформации в ЖКХ // *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*. 2022. № 1 (20). С. 106–114. DOI: 10.36622/VSTU.2022.69.60.011. EDN GCBLSZ.

Поступила в редакцию 27 февраля 2025 г.

Принята в доработанном виде 13 марта 2025 г.

Одобрена для публикации 2 апреля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Леонид Николаевич Чернышов** — доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 4654-4328, Scopus: 6603258508, ORCID: 0009-0007-1758-9498; leo.chern@yandex.ru;

Алексей Григорьевич Калгушкин — аспирант кафедры жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 5419-3087, ORCID: 0009-0008-1211-6007; aleksey.akbs@yandex.ru.

Вклад авторов:

Чернышов Л.Н. — научное руководство, концепция исследования, изучение исходной информации, итоговые выводы, научное редактирование.

Калгушкин А.Г. — поиск, анализ и обобщение исходной информации, написание исходного текста и его доработка.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Chernyshov L.N., Ivchik T.A., Kalgushkin A.G. Specific of functioning of the apartment buildings at the operational life cycle stage. *Construction Economy*. 2024; 9:343-347. EDN APJGKC. (rus.).

2. Azorin M.Yu. Implementation of the Concept of a Single Operator for the Integrated Development of Territories Based on the Financial Institute for the Development of Housing Construction JSC “DOM.RF”. *Bulletin of Baikal State University*. 2023; 33(4):744-754. DOI: 10.17150/2500-2759.2023.33(4).744-754. EDN TIGFTV. (rus.).

3. Ibadov N., Ladnykh I., Farzaliyev S. Selection of technological and organizational solutions for construction works with the use of a fuzzy relation of preferences. *Archives of Civil Engineering*. 2023. DOI: 10.24425/ace.2023.147677

4. Krivov A.S. Urban development of Russia: Images of the future. *Vestnik NOPRIZ*. 2024; 3(18):20-30. (rus.).

5. Bradley A., Li H., Lark R., Dunn S. BIM for infrastructure : an overall review and constructor perspective. *Automation in Construction*. 2016; 71:139-152. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.019

6. Eliseeva I.I., Bochenina M.V. Demand in the housing market and the needs of Russian people: an econometric approach. *Economic Revival of Russia*. 2022; 4(74):41-56. DOI: 10.37930/1990-9780-2022-474-41-56. EDN YQDDWY. (rus.).

7. Wong S.K., Chau K.W., Yau Y., Cheung A.K.C. Property price gradients: the vertical dimension. *Journal of Housing and the Built Environment*. 2011; 26(1):33-45. DOI: 10.1007/s10901-010-9203-8

8. Garnaga A.F., Okhotnikova Yu.V., Gromenko I.V., Tyukavkina I.L., Savkova N.V. Suburbanization processes in Russia and world. *The reasons. Features. Sociology*. 2020; 6:84-87. EDN VAZTXC. (rus.).

9. Vinogradskaya O.Ya. Why and from what townspeople move to the village: phenomenology and practice. *Russian Peasant Studies*. 2019; 4(3):140-155. DOI: 10.22394/2500-1809-2019-4-3-140-155. EDN LHQOPE. (rus.).

10. Korol E.A., Zhuravleva A.A. Algorithm for choosing rational organizational and technological solutions for the construction of low-rise residential buildings. *BST: Bulletin of Construction Equipment*. 2018; 7(1007):51-53. EDN XRSLFB. (rus.).

11. Pakhomova M.A., Khramtsov A.B. Low-rise construction in Russia and abroad : a review of practices. *Architecture, Construction, Transport*. 2022; 3:20-31. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-3-20-31. EDN UMTSNC. (rus.).

12. Baduge S.K., Thilakarathna S., Perera J.S., Arashpour M., Sharafi P., Teodosio B. et al. Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. *Automation in Construction*. 2022; 141:104440. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104440

13. Korol E.A., Zhuravleva A.A., Savin V.K. Organizational and technological modeling of the construction of low-rise residential buildings with rational energy con. Proceedings of Higher Educational Institutions. *Textile Industry Technology*. 2019; 4(382):184-189. EDN RVFUUP. (rus.).

14. Glass J., Bygballe L.E., Hall D. Transforming construction: the multi-scale challenges of changing and innovating in construction. *Construction Management and Economics*. 2022; 40(11-12):855-864. DOI: 10.1080/01446193.2022.2141432

15. Miroshnichenko D.A. Low-rise construction, its role and development prospects. *Science, technology, innovation in the world of global transformations : materials of the IX International scientific and practical conference*. 2021; 23-30. EDN TSYTPI. (rus.).

16. Rosłon J.H., Kulejewski J.E. A hybrid approach for solving multi-mode resource-constrained project scheduling problem in construction. *Open Engineering*. 2019; 9(1):7-13. DOI: 10.1515/eng-2019-0006

17. Zimin I.A. Analysis of the latest legislative initiatives in the field of solving the problems of managing common property in the territory of organized low-rise residential development. *Education and Law*. 2021; 11:116-124. DOI: 10.24412/2076-1503-2021-11-116-124. EDN PWEUOW. (rus.).

18. Lazarenko A.K. Terra incognita or SNT lands. *ZhKHExpert*. 2024; 8:20-23. (rus.).

19. Jaśkowski P., Biruk S., Krzemiński M. Modeling the problem of sequencing projects in the contractor's portfolio of orders. *Archives of Civil Engineering*. 2022; 68(3):307-322. DOI: 10.24425/ace.2022.141887

20. Cherezova N.V., Guzeva I.V. Problems of the formation of land relations in the implementation of "dacha" law on agricultural land and lands of human settlements. *International Agricultural Journal*. 2019; 4:28-32. DOI: 10.24411/2587-6740-2019-14060. EDN UCAOZD. (rus.).

21. Khomyakov D.A. Mechanism of development and optimization of the growth of the metropolitan residential suburbs. *Naukovedenie*. 2017; 9(2):103. EDN YPQJAP. (rus.).

22. Chernyshov L.N. Organizational, technical and methodological prerequisites for professional transformation in housing and communal services. *Housing and Utilities Infrastructure*. 2022; 1(20):106-114. DOI: 10.36622/VSTU.2022.69.60.011. EDN GCBLSZ. (rus.).

Received February 27, 2025.

Adopted in revised form on March 13, 2025.

Approved for publication on April 2, 2025.

B I O N O T E S : **Leonid N. Chernyshov** — Doctor of Economics Sciences, Professor, Professor of the Department of Housing and Public Utilities Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 4654-4328, Scopus: 6603258508, ORCID: 0009-0007-1758-9498; leo.chern@yandex.ru;

Alexey G. Kalguskin — postgraduate student of the Department of Housing and Public Utilities Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 5419-3087, ORCID: 0009-0008-1211-6007; aleksey.akbs@yandex.ru.

Contributions by authors:

Leonid N. Chernyshov — scientific guidance, research concept, study of the initial information, final conclusions scientific editing.

Alexey G. Kalguskin — search, analysis and synthesis of the source information, writing the source text and its refinement.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 658:624:517.98:519.2:621.039:005.93

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.941-956

Формирование реестра надежности подрядных организаций на основе использования цифровых платформ

Лариса Акрамовна Филимонова, Елена Николаевна Юзе,
Александр Владимирович Воронин, Ольга Александровна Жигунова
Тюменский индустриальный университет (ТИУ); г. Тюмень, Россия

*«Все на свете подлежит сомнению,
и это единственный способ правильно смотреть на вещи»
Дебора Моргак, английская писательница*

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность исследования обусловлена значимостью вопросов повышения прозрачности и доверия на рынке строительно-монтажных работ. Цель исследования — выбор цифровой платформы в качестве базы для развития государственной системы рейтингования участников подрядного рынка с разработкой механизма формирования реестра надежности подрядной организации. Отмечается недостаточная проработанность вопросов комплексного подхода к формированию подобного рода реестра в интересах всех заинтересованных сторон строительного рынка.

Материалы и методы. Использованы анализ, синтез, логика, методы индукции и дедукции, методы визуализации и многокритериальной оптимизации, которые позволили расширить теоретические положения по изучаемой проблеме логическими обобщениями и систематизацией, смоделировать процесс формирования реестра надежности подрядных организаций с учетом взаимозависимостей показателей оценивания надежности подрядчика.

Результаты. Основным результатом исследования — обоснование выбора цифровой платформы в качестве информационной базы для формирования государственного реестра с применением расширенной критериальной системы оценки надежности заявителя — конкурсанта, которая может быть использована и при условии заключения контрактов частного инвестора с подрядной организацией. Наряду с этим локальными результатами стали обзор рейтинговых цифровых площадок по поиску надежного подрядчика; разработанные базовые алгоритмы формирования реестра и оценки надежности подрядчика на государственных закупках через конкурсы; варианты формализации интегрального показателя надежности подрядчика.

Выводы. Обоснованы как ключевые характеристики реестра надежности подрядной организации на государственных закупках, так и процесс его формирования через алгоритм рейтингования, раскрывающий содержательные аспекты отнесения конкурсанта к соответствующему уровню надежности на подрядном рынке. Благодаря отбору участников торгов и определению их надежности в ходе подготовки к торгам заинтересованные стороны строительного рынка получают инструмент для повышения эффективности размещения инвестиционных средств, в том числе в инфраструктурные инвестиционно-строительные проекты развития территорий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: государственные закупки, реестр, надежность, оценка, рейтингование, критериальная система надежности

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Филимонова Л.А., Юзе Е.Н., Воронин А.В., Жигунова О.А. Формирование реестра надежности подрядных организаций на основе использования цифровых платформ // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 6. С. 941–956. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.941-956

Автор, ответственный за переписку: Лариса Акрамовна Филимонова, Filimonoval@tyuiu.ru.

Formation of the register of reliability of contractors based on the use of digital platforms

Larisa A. Filimonova, Elena N. Yuze, Aleksandr V. Voronin, Olga A. Zhigunova
Industrial University of Tyumen (IUT); Tyumen, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the study is due to the importance of issues of increasing transparency and trust in the construction and installation works market. The purpose of the work was to select a digital platform as a basis for the develop-

ment of a state system for rating participants in the contracting market with the development of a mechanism for forming a Contractor Reliability Register. It is noted that the issues of an integrated approach to the formation of such a register in the interests of all interested parties in the construction market are not sufficiently devised.

Materials and methods. In the study, the authors relied on analysis, synthesis, logic, methods of induction and deduction, methods of visualization and multi-criteria optimization, which allowed them to expand the theoretical provisions on the problem under study with logical generalizations and systematization, and to model the process of forming the Reliability Register of Contracting Organizations, taking into account the interdependencies of the indicators for assessing the reliability of the contractor.

Results. The main result of the study includes the justification of the choice of a digital platform as an information base for the formation of a state register using an extended criteria system for assessing the reliability of an applicant — competitor, which can also be used if contracts are concluded between a private investor and a contractor. Along with this, local results were a review of rating digital platforms for finding a reliable contractor; developed basic algorithms for forming a register and assessing the reliability of a contractor in public procurement through tenders; options for formalizing the integral indicator of contractor reliability.

Conclusions. The paper substantiates both the main characteristics of the Reliability Register of a Contracting Organization in Public Procurement and the process of its formation through a rating algorithm that reveals the substantive aspects of classifying a contestant as belonging to the appropriate level of reliability in the contracting market. By selecting bidders and determining their reliability during preparation for bidding, interested parties in the construction market will receive a tool for increasing the efficiency of investment allocation, including in infrastructure investment and construction projects for territorial development.

KEYWORDS: government procurement, registry, reliability, assessment, rating, reliability criteria system

FOR CITATION: Filimonova L.A., Yuze E.N., Voronin A.V., Zhigunova O.A. Formation of the register of reliability of contractors based on the use of digital platforms. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(6):941-956. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.941-956 (rus.).

Corresponding author: Larisa A. Filimonova, Filimonovala@tyuiu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития нашего общества изучение текущих рейтингов компаний на страховом, финансово-кредитном, строительном и иных рынках становится обязательной частью ведения бизнеса. Формирование качественной информационной базы по участникам торгов для принятия обоснованных управленческих решений на стадии предварительного изучения подрядных организаций является одной из важнейших задач, решению которой в научных источниках уделяется недостаточно внимания. Доступ к информации можно получить на публичных информационно-телекоммуникационных платформах: Яндекс¹, Интерфакс — сервер раскрытия информации² и пр. Зачастую эти ресурсы не позволяют в полной мере оценить надежность и компетентность претендентов, предоставляя информацию достаточно разрозненного характера. В связи с этим создание реестра надежных подрядных организаций представляется актуальным и должно быть направлено на повышение прозрачности процессов их выбора при планировании инвестиций в объекты строительства. Отметим, что на актуальность этой проблематики обратили внимание в статье, посвященной созданию Минстроем России совместно с НОСТРОЕМ глобальной системы рейтинга подрядчиков, в которой описан опыт Республики Узбекистан³, где на государ-

ственном уровне внедрили рейтингование строительных и проектных компаний [1]. Наряду с этим ранее Минстрой России совместно с НОСТРОЕМ в 2023 г. приступили к формированию Национального реестра добросовестных производителей и поставщиков строительных материалов (далее — НРДП) на базе каталога импортозамещения, который насчитывает 4000 позиций от 520 производителей⁴. На сегодняшний день НОСТРОЙ продолжает работу над формированием Национального реестра специалистов, механизма оценки опыта и деловой репутации подрядных организаций с синхронизацией Единого реестра сведений о членах саморегулируемых организаций (СРО) и их обязанностях. Методология рейтингования НОСТРОЙ находится в стадии обсуждений и обобщения предложений. Разрабатываемый реестр позволит предоставить заказчику дополнительные гарантии безопасности и качества выполнения работ, а добросовестным подрядным организациям даст возможность повысить доступность к госзаказам, к новым источникам финансирования, а также к инструментам страхования.

Все вышеперечисленное обуславливает важность вопросов, связанных с формированием реестра надежности подрядчика на государственных закупках через конкурсы, теоретическую и практическую значимость их систематизации и обобщения.

¹ URL: <https://www.rusprofile.ru/id/10449404>

² Центр раскрытия корпоративной информации. URL: <https://e-disclosure.ru/>

³ Строительный информационный портал. URL: <https://stroyportal33.ru/minstroj-rossii-sovmestno-s-nostroj-sozdadut-globalnuyu-sistemu-rejtinga-podryadchikov/>

⁴ Глава Минстроя России Ирек Файзуллин оценил работу НОСТРОЙ и системы саморегулирования в строительстве // Минстрой России. URL: https://www.minstroyf.gov.ru/press/glava-minstroya-rossii-irek-fayzullin-otsenil-rabotunostroy-i-sistemy-samoregulirovaniya-v-stroitel/?sphrase_id=2315206

Государственные закупки способствуют обеспечению прозрачности и конкуренции на рынке, снижению затрат и повышению качества приобретаемых товаров, работ, услуг. Это наиболее актуально в государственных и муниципальных закупках, где необходимо учитывать интересы налогоплательщиков. В условиях современного рынка, где конкуренция за государственные и частные контракты становится все более жесткой, формирование объективного реестра надежности подрядной организации приобретает особую значимость. Под так называемым реестром надежности подрядчика следует понимать интегрированный информационный ресурс, который содержит данные о действующих подрядных организациях, их репутации, финансовой устойчивости, опыте выполнения контрактов и способности к реализации обязательств.

Обычно требования к подрядчику по конкурсной документации сводятся к формулировке «наличие у них финансовых ресурсов, на праве собственности или ином законном основании оборудования и других материальных ресурсов, опыта работы, связанного с предметом контракта, и деловой репутации, специалистов и иных работников определенного уровня квалификации». Проведенный обзор судебной практики позволил сформулировать ключевые проблемы, с которыми сталкивается заказчик, что предопределяет значение настоящего исследования:

1. Ограниченность критериев оценки: критерии оценки заявок участников закупки, предусмотренные Федеральным законом № 44-ФЗ⁵, часто не позволяют учитывать все факторы, влияющие на успешность реализации строительного проекта; основной упор делается на ценовые предложения, а не на качественные характеристики подрядчика.

2. Формальный подход к оценке квалификации штата сотрудников подрядчика: требования к квалификации участников закупки, как правило, носят формальный характер и не позволяют в полной мере оценить их опыт и профессионализм в сфере строительства.

3. Возможность демпинга: участники закупки могут предлагать заниженные цены, что приводит к снижению качества работ и срыву сроков строительства.

4. Сложность контроля за исполнением контракта: контроль за исполнением государственного контракта требует значительных ресурсов и опыта, а также эффективной системы мониторинга и отчетности.

5. Ограниченность информации о подрядчиках: отсутствие общедоступной информации о на-

дежности и компетентности потенциальных подрядчиков затрудняет процесс выбора.

Таким образом, отсутствие прозрачной и достоверной информации, недостаточное методическое обеспечение усложняет процесс выбора и увеличивает риски заказчика. В связи с этим создание реестра надежных подрядчиков представляется необходимой мерой, направленной на повышение прозрачности и доверия на рынке строительно-монтажных работ (СМР).

Цель исследования — выбор цифровой платформы в качестве базы для развития государственной системы рейтингования участников подрядного рынка с разработкой механизма формирования реестра надежности подрядной организации, учитывающего многокритериальность их оценки и позволяющего обеспечивать более прозрачные и эффективные тендерные закупки. Предмет исследования — процессы развития информационно-цифровых технологий современного рынка нематериальных активов и процессы формирования реестра надежности подрядной организации, а также критерии, по которым осуществляется оценка их надежности в контексте тендерных закупок. Объект исследования — критериальная система информационно-цифровой платформы, учитывающая качественные и количественные характеристики участников подрядного рынка, составляющая информационную основу базы для банка данных реестра надежности подрядчика для участия на государственных закупках.

Проведенный обзор литературы по данной проблеме [1–19] позволяет не только определиться с понятийным аппаратом, но систематизировать и обобщить базовые элементы и основные процедуры, раскрывающие внутреннюю закономерность процесса формирования реестра надежности подрядной организации на государственных закупках через конкурсы. В ходе исследования рассматривались общие теоретические положения теории конкуренции, использованы положения авторских методов применительно к особенностям функционирования отрасли строительства, развития подрядного рынка, оценки строительных рисков следующих исследователей: В.В. Бузырева, В.В. Герасимова, Е.А. Гусакова, А.В. Лещинского, И.Г. Лукмановой, А.С. Павлова, Б.Б. Хрусталева, А.А. Черниченко и др. [1–8]. Обобщены и систематизированы проблемы, представленные в аналитических исследованиях зарубежных авторов [9–14] и отечественных авторов А.Н. Асаула, Т.И. Берг, В.Д. Васильева, Л.Т. Гиляровой, В.Н. Жигалова, А.Н. Макарова, В.И. Мальхина, А.С. Малькова, Е.В. Кашина, Р.И. Трухаева [15–19]. В исследовании учтены позиции этих авторов относительно ключевого критерия оценки конкурентоспособности предприятия, его надежности с позиций исполнения договорных (контрактных) обязательств. При этом первостепенное значение

⁵ О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд : Федеральный закон от 05.04.2013 № 44-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_law_144624/

отводится одному из важнейших элементов конкурентоспособности — «ресурсному потенциалу подрядчика», на что обращают особое внимание в своих публикациях многие ученые и практики [5–8]. Изучены методы и подходы в оценке ресурсного потенциала в отечественной и зарубежной практике. Представляется целесообразным в оценке надежности подрядчика особое внимание уделять исполнению контрактных обязательств не только по срокам, но и с учетом ряда других позиций технико-технологических решений, применяемых ресурсов, управления их стоимостью и пр.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Подрядный рынок, рынок СМР являются сложной и капиталоемкой сферой деятельности, где успех проекта во многом зависит от надежности и профессионализма подрядчика. Выбор недобросовестного или некомпетентного подрядчика может привести к многочисленным негативным последствиям как для заказчика, включая срыв сроков строительства, превышение бюджета по проекту, судебные разбирательства, и, в конечном итоге, финансовые потери, так и для общества. В условиях высокой конкуренции на рынке СМР заказчикам часто бывает сложно оценить реальные возможности и надежность подрядчиков.

Проводимое исследование базируется на комплексном подходе к формированию реестра надежности подрядной организации на государственных закупках через конкурсы с использованием методов многокритериальной оптимизации. Комплексный подход, опираясь на анализ, синтез, логику, методы индукции и дедукции, метод визуализации, позволяет сопровождать выдвигаемые теоретические положения по исследуемой проблеме логическими обобщениями и систематизацией, рассмотреть и воссоздать процесс формирования реестра надежности подрядной организации во всем многообразии связей и взаимозависимостей, подтверждая его многогранность. Сформированный методический подход к решению исследуемой проблемы предполагает рассмотрение и обсуждение основных характеристик реестра надежности подрядной организации на государственных закупках через конкурсы, процесс его формирования и базовых алгоритмов, раскрывающих их содержательные аспекты.

Считаем заслуживающим внимания предложение расширить критериальную базу по заявителю-конкурсанту при регистрации в информационно-телекоммуникационной сети ГИС Торги с учетом предлагаемого комплексного подхода к формированию их рейтинга на основе многокритериальной задачи со статистическими данными производственной программы и ресурсной обеспеченности подрядчика кадрами, техникой, технологиями и прочим, что повышает уровень надежности оценочного суждения экспертного подхода, при кото-

ром заказчик ориентируется на многолетний опыт эксперта, аналитика в этой сфере и его профессиональное мнение относительно оцениваемого подрядчика. Согласно положениям нормативно-правовой базы (ФЗ № 44-ФЗ⁵, № 223-ФЗ⁶) ключевым критерием для выбора подрядчика и признания его победителем на аукционах выступает его цена предложения на торгах, в связи с чем управление ресурсным потенциалом подрядчика сводится к оптимизации затрат на выполнение контракта. В конкурсах отбор претендентов в современной практике осуществляется по более широкому спектру критериев, отражающих ресурсный потенциал подрядчика: наличие собственной спецтехники, лаборатории, специалистов профильных профессий и др. Учитывая, что дорожное строительство, взятое авторами как пример для анализа, является важной составляющей строительной сферы, в исследовании спектр внимания будет сосредоточен на ситуации выбора подрядчиков при строительстве линейных объектов.

Теоретико-методологическая основа использования методов оценки надежности подрядчика через его ресурсный потенциал применительно к особенностям функционирования строительного и дорожно-строительного предприятия на сегодняшний день окончательно не сформирована, что снижает уровень маневренности подрядчика, потенциал которого полностью зависит от результатов торгов государственных (муниципальных) контрактов. Совместное применение аналитического и экспертного подхода в оценке подрядчика (застройщика, генерального подрядчика) повышает уровень его надежности и вероятность исполнения контракта в срок.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изучив многообразие подходов к определению критериев оценивания, представленных в публичных источниках сети интернет, а также публикации отечественных и зарубежных ученых и экспертов по вопросам конкурентоспособности, надежности подрядных организаций на основе использования информационно-цифровых баз-данных, сайтов оценочных рейтинговых агентств, считаем обоснованным поставить вопрос относительно совершенствования методического подхода к формированию критериальной системы оценки надежности подрядной организации, который будет полезен не только для заказчика, но и для подрядчика.

Перейдем к изложению направлений совершенствования. Прежде всего, публичные интернет-ресурсы цифровых платформ с рейтингами могут послужить базисом в поиске надежного подрядчика

⁵ О закупках товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц: Федеральный закон от 18.07.2011 № 223-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_law_116964/

на рынке СМР, в том числе линейных объектов недвижимости.

В развитие этого положения авторы составили обзор цифровых платформ в табл. 1.


Охарактеризуем выборку цифровых платформ, представленных в табл. 1. Рейтинг «Рейтинг Рунета» информационно-аналитического агентства ООО «Проактивити» учитывает лишь объемы ввода зданий в эксплуатацию в натуральном выражении. Рейтинг Top-20 крупнейших застройщиков сетевого издания forbes.ru публикуется с периода регистрации издания, помимо объемов ввода зданий в натуральном выражении присутствуют такие показатели, как выручка от реализации готовой продукции, дата начала деятельности на первичном рынке недвижимости. Портал Единый ресурс застройщиков, разработчик ООО «Институт развития строительной отрасли», согласно данным рейтинга можем видеть расширенный сегмент критериальной системы и определить гораздо большее количество показателей оценки застройщика/подрядчика, чем в представленных выше ресурсах, а именно: появляется такой важный показатель как соблюдение застройщиком декларируемого срока ввода в эксплуатацию

задания (% переноса срока ввода здания в эксплуатацию на следующий отчетный период за пределами оговоренного срока в проектной декларации на объект капитального строительства). Критериальная система показателей представлена более чем ста параметрами, определяющими качество возводимого здания и надежность застройщика/подрядчика.

Информационно-коммуникационная цифровая платформа проекта «Все о стройке» прошла регистрацию в марте 2023 г., что является достаточно коротким периодом для обеспечения репрезентативности данных в масштабах всей страны. Ресурс, с одной стороны, обладает традиционными показателями по застройщикам/подрядчикам (натуральные показатели производственной программы строительной организации: м², количество домов, квартир), с другой стороны, предлагает использовать неоднозначный, по мнению авторов, критерий «Надежность», который формируется по результатам авторизации респондента и выставлению балла. При этом возникают вопросы о репрезентативности выборки (качестве фокус-группы), объективности оценочного суждения респондента, не имеюще-

Табл. 1. Фрагмент сводки публичных интернет-ресурсов рейтинговых площадок в поиске надежного подрядчика

Table 1. Fragment of a summary of public Internet resources of rating platforms in search of a reliable contractor

Агентство Agency	Ссылка на ресурс Link to resource	Агентство Agency	Ссылка на ресурс Link to resource
Проект рейтинг «Рейтинг Рунета». ООО «Проактивити», информационное аналитическое агентство. Дата регистрации 2007 г. Rating project “Runet Rating”. Proactiviti LLC, information and analytical agency. Date of registration 2007		Сетевое издание forbes.ru. Дата регистрации 23.12.2021 Online publication forbes.ru. Date of registration: December 23, 2021	
Портал Единый ресурс застройщиков (портал ЕРЗ.РФ). Дата регистрации 28.03.2016. ООО «Институт развития строительной отрасли» Portal “Unified resource of developers” (portal ERZ.RF). Date of registration 03/28/2016. LLC “Institute for development of the construction industry”		Проект «Все о стройке», Независимая площадка девелопмента России и стран СНГ. Дата регистрации 13.03.2023 Project “All about construction”, Independent development platform of Russia and the CIS countries. Date of registration 03/13/2023	
АСРО «Гильдия строителей Урала». Дата регистрации 06.11.2008 “Guild of Ural Builders”. Date of registration: 06.11.2008		ООО «Движение.ру». Дата регистрации 26.01.2024 Dvizhenie.ru. Date of registration 01/26/2024	
ООО «ТехноНИКОЛЬ», «Строительные Системы», г. Москва. Платформа ROOF.ru. Дата регистрации 01.07.2020 TechnoNIKOL LLC, Construction Systems, Moscow. Platform ROOF.ru Date of registration 01.07.2020		ООО «Rusprofile» Дата регистрации 2013 г. Rusprofile Registration date 2013	

го доступ к первичным документам застройщика, судебной статистике и прочим неявного характера данным, которые могут описывать застройщика/подрядчика. К недостаткам ресурса следует отнести отсутствие методики расчета рейтинга застройщика/подрядчика.

АСРО «Гильдия строителей Урала». Согласно выставленным на сайте материалам «Положение» и «Опросный лист», можно утверждать наличие «узкого» подхода к используемой системе оценки. Она ограничена только данными о членах АСРО (33 юридических лица), которые ограничены территориально (г. Екатеринбург). В систему критериев включен блок вопросов, связанных с видами работ, фактами недобросовестного выполнения обязанностей застройщика, поставщика, в том числе в части нарушения сроков производства работ по заключенным договорам.

ООО «Движение.ру» относится к категории новичков на рынке информационно-цифровых технологий в оценке надежности подрядчика. Предлагаемая разработчиком методика вызывает удивление, так как речь идет об опросе общественного мнения респондентов.

Разработчиком цифровой платформы проекта ROOF.ru выступает также новичок на рынке аналитического ресурса ООО «ТехноНИКОЛЬ», «Строительные Системы», г. Москва. Компания не выставила методическую составляющую рейтинговых оценок, представленных на своем ресурсе, что вызывает определенное недоверие авторов статьи к объективности оценочного суждения.

У большинства аналитических агентств официальной задачей стоит ранжирование участников отрасли строительства, основываясь на совокупности критериев. При этом многочисленные разнообразные аналитические, рейтинговые агентства оставляют за собой право не прописывать методику и алгоритмы оценки, не раскрывать набор применяемых критериев оценки, что оставляет ощущение явной повторяемости, антуражности при всем их види-

мом рациональном обосновании. Общепринятыми критериями выступают объемы выполненных строительно-монтажных или дорожно-строительных работ в натуральном и стоимостном выражениях; натуральные показатели ввода зданий и сооружений в эксплуатацию.

Наибольший интерес вызвал проект Rusprofile на рынке информационно-цифровых технологий с 2013 г. Платформа позволяет принимать важные решения при заключении миллионов сделок, банк данных которой формируется из госреестров. По состоянию на 2024 г. на платформе собраны материалы по более чем 10 млн юридических лиц и 16 млн индивидуальных предпринимателей в Open data. Авторы статьи считают, что именно платформа ресурса Rusprofile⁷ — сервис проверки и анализа контрагентов, представляет практический интерес в качестве базы при формировании реестра надежного поставщика (рис. 1–4) для Минстроя РФ.

Функциональные возможности, которыми располагает цифровая платформа сервиса Rusprofile, позволяют определить: надежность конкурсанта (рис. 2); рейтинг в отрасли; госзакупки, где объект оценки в роли поставщика, заказчика (рис. 3); финансы; арбитражные события; долги, количество производств, штрафы, взыскания, прочее; банкротство счетов, обеспечительные меры на имущество, активные договорные споры, активные и завершенные арбитражные споры; конкуренты (рис. 4); изменения ЕГРЮЛ; реестры ФНС; завершенные и активные проверки; банкротство; связи с иными компаниями; признаки однодневки; риски неисполнения обязательств.

Оценка надежности подрядной организации — важная задача для всех участников инвестиционно-строительного рынка, стремящихся сократить риски в процессе ведения бизнеса, коммуникаций и сотрудничества, именно эта оценка лежит в основе включения или невключения подрядчика в реестр

⁷ Rusprofile. URL: <https://www.rusprofile.ru/features>

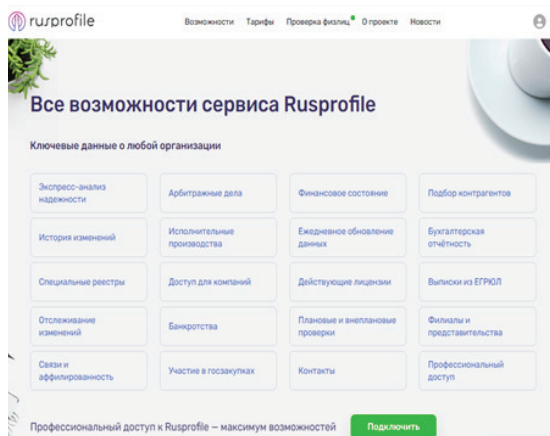


Рис. 1. Функциональное назначение сервиса Rusprofile

Fig. 1. Functional purpose of the Rusprofile service

Рис. 2. Фрагмент ресурса Rusprofile на примере запроса АО «Ямалавтодор»

Fig. 2. Fragment of the Rusprofile resource for the request JSC “Yamalavtodor”

Рис. 3. Фрагмент ресурса Rusprofile по запросам «Госзакупки», «Рейтинг»

Fig. 3. Fragment of the Rusprofile resource on requests “Government procurement”, “Rating”

надежности. Синтез подходов к оценке и выбору подрядчика требует определенной квалификации и базового уровня аналитических знаний от эксперта со стороны не только государственных органов, но и со стороны частного капитала. От эксперта также требуются умения профессионально манипулировать аналитическими схемами и подходами в оценке подрядчика — конкурсанта в условиях риска, неопределенности и ограниченности публичных информационных ресурсов. Данную проблему возможно устранить посредством совершенствования действу-

ющей цифровой платформы Rusprofile с применением авторской расширенной критериальной системы оценки заявителя — конкурсанта, что позволит сократить временные, финансовые и трудовые ресурсы Минстроя РФ на запуск реестра.

Для практикующих экспертов Минстроя РФ авторами предлагается следующее методическое решение: на основе классических эмпирических данных по подрядчику оценить его ресурсный потенциал. Это даст возможность застройщику (заказчику, инвестору) осуществлять постоянный мони-

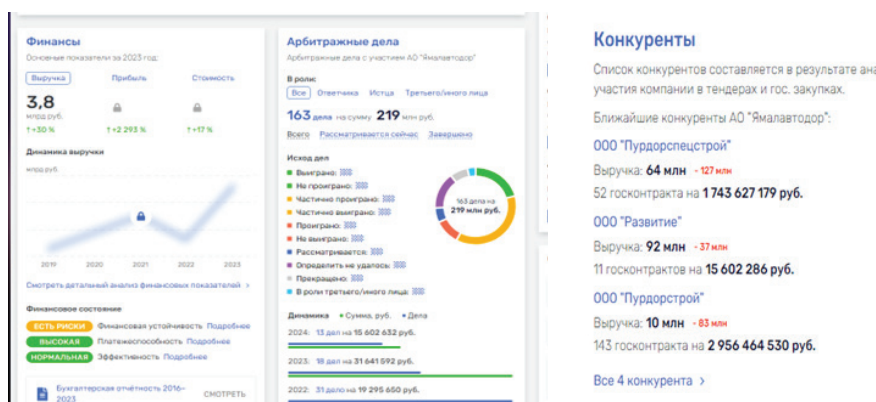


Рис. 4. Фрагмент ресурса Rusprofile по запросам «Финансы», «Арбитражные дела», «Конкуренция»

Fig. 4. Fragment of the Rusprofile resource for the queries “Finance”, “Arbitration cases”, “Competitors”

торинг за подрядчиком, формировать собственный рейтинг их надежности и «черный список» на будущие контракты.

При создании реестра надежности подрядных организаций на государственных закупках через конкурсы важно определить из всего разнообразия критериев те, которые позволяют объективно оценить степень доверия к подрядчику и будут учитываться при оценке их надежности стороной заказчика. Учитывая, что речь в исследовании идет о формировании реестра надежности подрядной организации на государственных закупках через конкурсы, представляется целесообразным представить общий алгоритм этого процесса (рис. 5).

Предлагаемый авторами статьи реестр надежности подрядных организаций будет представлять собой синтез реестра недобросовестных поставщиков, реестра недобросовестных подрядных организаций⁸, реестра квалифицированных подрядных организаций⁹ Минстроя РФ. Проведя ретроспективный анализ сведений реестров недобросовестных поставщиков и недобросовестных подрядных организаций, можно утверждать о приоритетности сведений о конкурсантах лишь с позиции невыполнения сроков исполнения контрактных обязательств со стороны подрядчика. Сведения Реестра квалифицированных подрядных организаций содержат в основном информацию по стоимости ими заключенных и исполненных контрактов и по СПО, членом которой является подрядчик. Данная информация важна для установления предела стоимости контракта, на который может заявиться подрядчик — конкурсант.

Проведя мониторинг нормативно-правовой базы, регламентирующей направления производственно-хозяйственной деятельности подрядчика, публика-

ций открытых источников и периодических научных журналов, авторы статьи предлагают расширить критериальную систему оценки надежности подрядной организации через призму ее ресурсного потенциала применительно к особенностям сферы деятельности и региона выполнения контракта (рис. 6).

Блок 1. Кадры подрядчика. Подтверждение кадровой обеспеченности: наличие квалифицированных специалистов списочного и несписочного составов, обладающих знаниями и опытом; наличие профильного образования и опыта работы квалифицированных специалистов (профессия, специализация, квалификация (дипломы, сертификаты, удостоверения о повышении квалификации и прочее)); сведения по лицензиям, сертификатам, патентам; средний возраст рабочих; текучесть кадров; уровень травматизма и профессиональной заболеваемости.

Блок 2. Материально-техническая база подрядчика. Подтверждение наличия сформированной транспортной логистики и постоянных поставщиков материальных ресурсов: длительность договорных отношений; структура поставок материалов по поставщикам и прочее. Подтверждение наличия материально-технической обеспеченности: предоставление данных о материально-технической базе (собственные, аренда, лизинг); техническое состояние техники, оборудования, транспорта; наличие собственной складской логистики; резервные мощности; процент износа и другое.

Блок 3. Технология производства строительных работ, оказания услуг по капитальному ремонту и реконструкции зданий. Подтверждение качества выполненных работ: наличие сертификаций и лицензий, соответствующих требованиям отрасли; использование современных технологий и методик работы; оценка качества выполненных работ, в том числе соответствия стандартам и нормативам; наличие санкций за несоответствие или нарушение условий контрактов.

Блок 4. Менеджмент. Подтверждение наличия стратегических долгосрочных планов развития

⁸ Единая информационная система в сфере закупок. URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/dishonestsupplier/search/results.html>

⁹ Единая информационная система в сфере закупок. URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/rkpo/search/results.html>

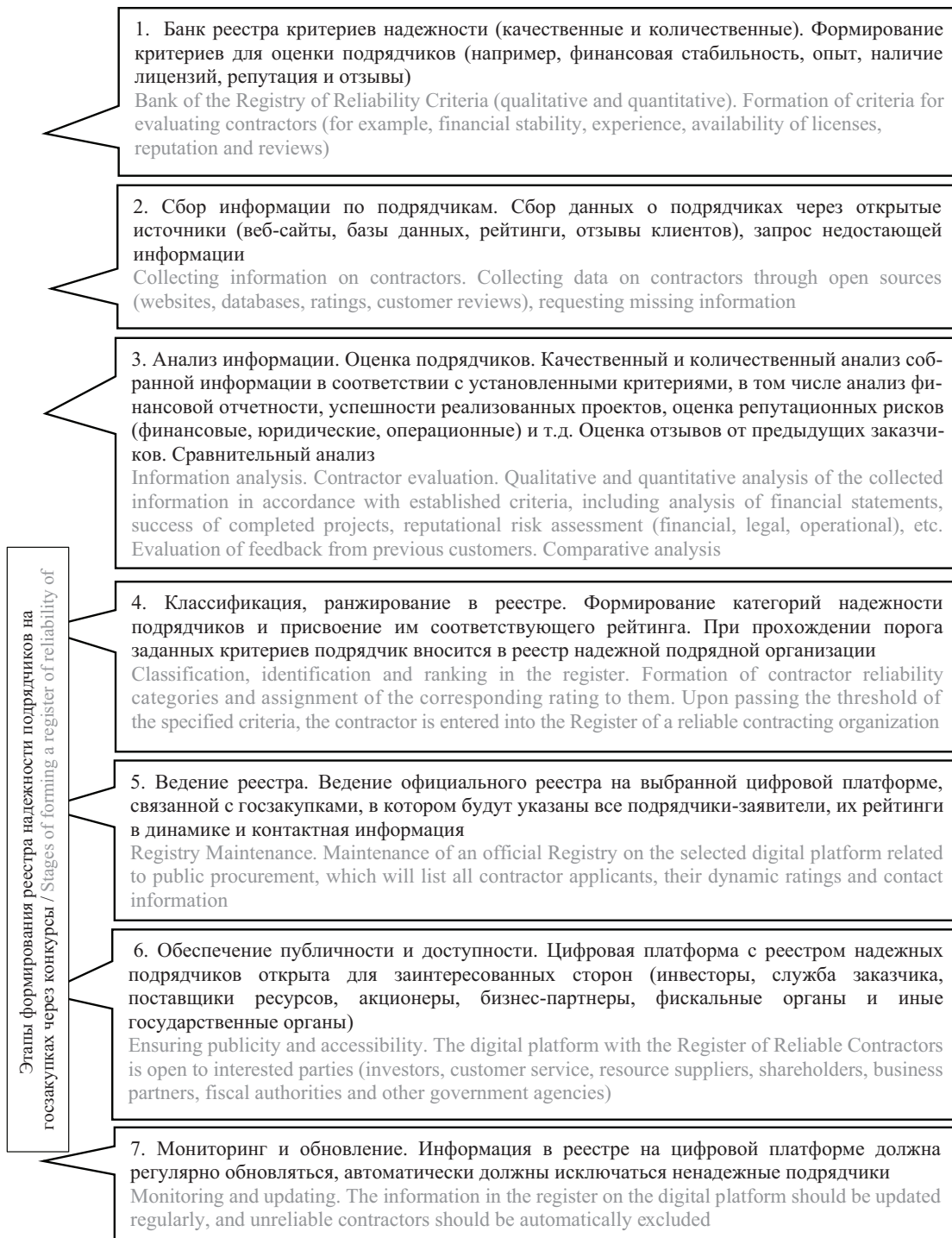


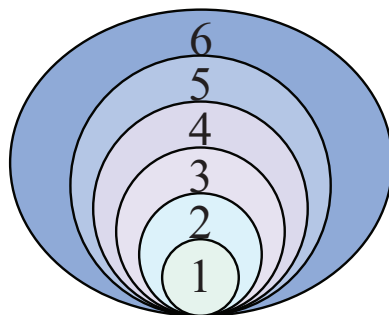
Рис. 5. Этапы формирования реестра надежности подрядной организации на государственных закупках через конкурсы. Авторская модель

Fig. 5. Stages of forming a Register of reliability of contractors in public procurement through competitions. Author's model

подрядной организации и системы управления рисками: декомпозиция стратегий и планов развития бизнеса; наличие систем управления проектами и рисками; эффективность планирования и организации работ; социальная ответственность менеджмента перед коллективом и обществом; участие подрядной организации в благотворительных проектах, социальные инициативы; соблюдение норм

охраны труда и окружающей среды; устойчивость подрядной организации к изменениям на рынке и адаптация к новым условиям.

Блок 5. Финансы. Подтверждение финансовой устойчивости, платежеспособности и обеспеченности: амортизационный фонд и иные источники инвестиций; бухгалтерская (финансовая) отчетность; показатели финансовой устойчивости, платежеспо-



- | | |
|---|---|
| 1 — Кадры подрядчика | 4 — Менеджмент |
| 2 — Материально-техническая база подрядчика | 5 — Финансы |
| 3 — Технология производства строительных работ, оказания услуг по капитальному ремонту и реконструкции зданий | 6 — Репутация, имидж, опыт работы, связанный с предметом контракта, риски, деловая репутация |
| 1 — Contractor's personnel | 4 — Management |
| 2 — Contractor's material and technical base | 5 — Finance |
| 3 — Technology of construction works, provision of services for capital repairs and reconstruction of buildings | 6 — Reputation, image, work experience related to the subject of the contract, risks, business reputation |

Рис. 6. Блоки критериальной системы реестра надежности подрядной организации. Авторская модель банка данных
 Fig. 6. Blocks of the criteria system of the contractor's reliability register. Author's model of the Data Bank

собности и деловой активности по системе МСФО; отсутствие признаков банкротства; мониторинг кредиторской и дебиторской задолженности по размеру задолженности и сроку возмещения.

Блок 6. Репутация, имидж, опыт работы, связанный с предметом контракта, риски, деловая репутация. Подтверждение опыта работы: предоставление перечня выполненных проектов, количество успешно завершенных проектов, особенно аналогичных по сложности и масштабу; отзывы заказчиков; динамика ввода в действие производственных мощностей и линейных объектов; динамика выполнения плана ввода в действие объектов по их мощности, сметной стоимости; структура распределения выполненных подрядных работ собственными и субподрядными силами; степень отклонения сведений по проектной и рабочей документации по объекту капитального строительства и/или объекту реконструкции и прочее. Проверка информации о подрядчике в открытых источниках: средствах массовой информации, социальных сетях, профессиональных форумах и прочее; наличие судебных разбирательств, штрафов и других санкций; история разрешения споров с заказчиками.

Указанные блоки по совокупности формируют имидж подрядчика, уровень его репутационных рисков, что возможно унифицировать и формализовать для идентификации подрядчика — конкурсанта посредством расчета интегрального (сводного) критерия оценки надежности подрядчика. Принятие решения о включении в реестр надежности подрядной организации осуществляется после технического

анализа эмпирических данных заявителя — конкурсанта на выбранной цифровой платформе на основе комплексного подхода к оценке надежности подрядчика (рис. 7). Авторская модель методического подхода к оценке надежности подрядчика базируется на принципах стандартизации (нормализации) исходных данных по конкурсанту, что позволяет разноименные показатели привести к безразмерной величине, результатом чего является расчет интегрального (сводного) критерия оценки надежности объекта исследования.

В рамках подхода 1 к стандартизации (нормализации) значений исходной базы по конкурсанту предлагается рассчитать коэффициенты соотношения (координаты) x_{ij} через соотношение показателя по конкурсанту в сравнении с аналогичным значением показателя конкурента — лидера в отрасли. В этом случае расчет интегрального критерия рекомендуем осуществлять через средневзвешенное значение критерия с использованием коэффициентов важности:

$$НП = \sum_i \sum_j \lambda_i \beta_{ij} x_{ij}, \quad (1)$$

где НП — надежность подрядчика; $\sum \lambda_i = 1, \sum \beta_{ij} = 1$ — нормируемые условия, означающие, что сумма значений коэффициентов относительной важности должна равняться единице; λ_i — коэффициент относительной важности i -й группы показателей по объектам капитального строительства/ремонта/реконструкции ($i = 1; L$); β_{ij} — коэффициент относительной важности j -го блока показателей в i -й группе ($j = 1;$

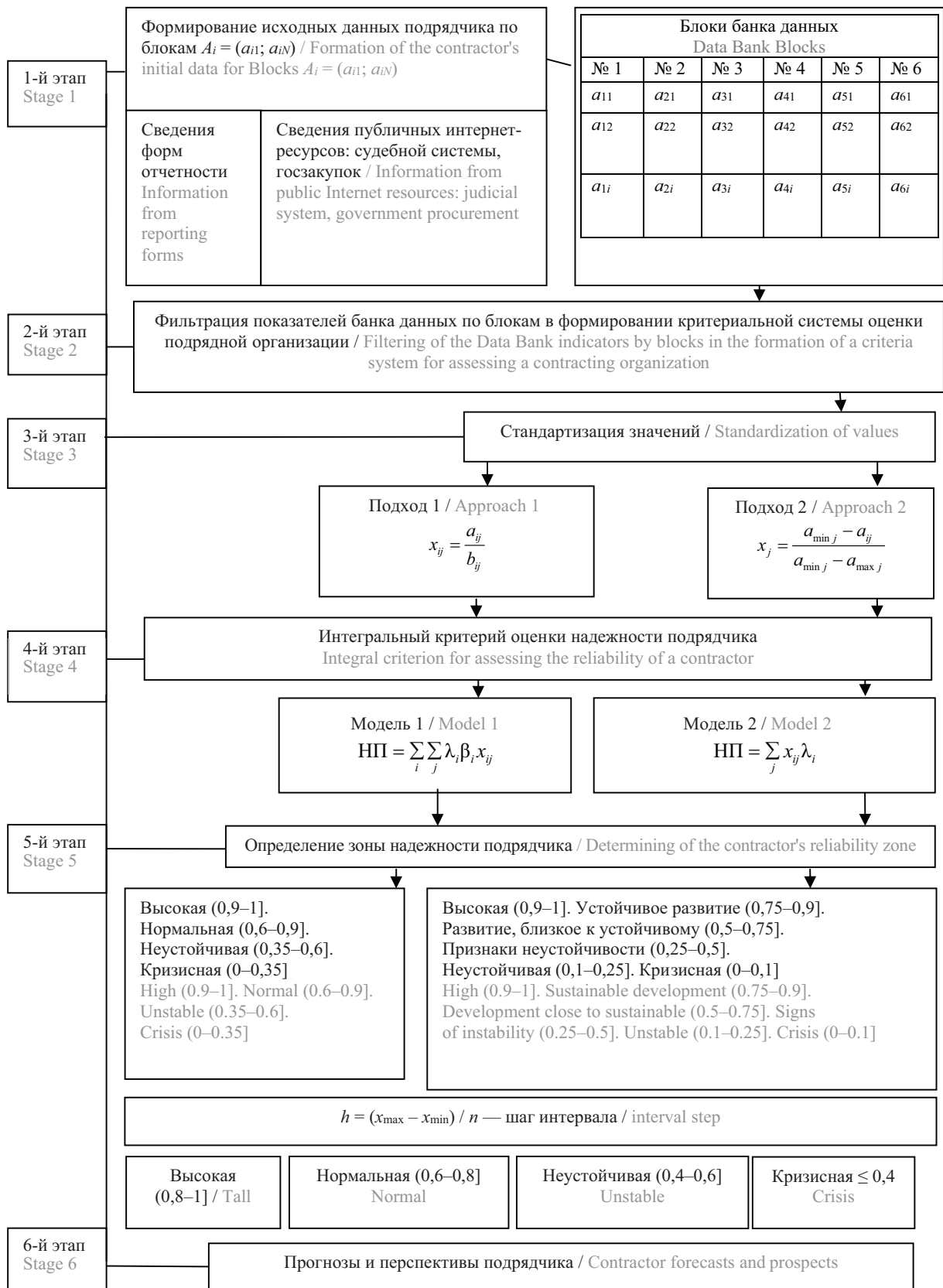


Рис. 7. Методический подход к оценке надежности подрядчика на цифровой платформе реестра. Авторская модель

Fig. 7. Methodological approach to assessing the reliability of a contractor on the digital platform of the Register. Author's model

Табл. 2. Комплексная оценка надежности подрядчика АО «Ямалавтодор» через его ресурсный потенциал
 Table 2. Comprehensive assessment of the reliability of the contractor “Yamalavtodor” through its resource potential

Номер модели Model number	Период Period	Уровень надежности подрядчика Contractor reliability level	Зона надежности подрядчика Contractor reliability zone
1	2018	0,658	Нормальный уровень надежности Normal level of reliability
	2019	0,563	Зона неустойчивого положения Zone of unstable position
	2020	0,627	Нормальный уровень надежности Normal level of reliability
	2021	0,844	Высокая надежность High reliability
	2022	0,675	Нормальный уровень надежности Normal level of reliability
2	2018	0,561	Зона неустойчивого положения Zone of unstable position
	2019	0,228	Кризисное положение Crisis situation
	2020	0,286	Кризисное положение Crisis situation
	2021	0,657	Нормальный уровень надежности Normal level of reliability
	2022	0,547	Зона неустойчивого положения Zone of unstable position

N , где N_i — число показателей в i -й группе); x_{ij} — коэффициент соотношения значения j -го показателя i -й группы организаций с аналогичным показателем ведущих (лидеров) организаций отрасли.

Согласно второму подходу для оценки уровня надежности подрядчика задаются максимальные и минимальные уровни по всем критериям, включенным в блок банка данных, имеющих количественную форму. При стандартизации (нормализации) значений исходного банка данных по конкурсанту предлагается рассчитать коэффициенты соотношения (координации) x_{ij} по формуле (2) в ретроспективе по показателю блока, используя мак-

симинный подход метода расстояний. Показатели нормируются относительно минимального и максимального значений:

$$x_j = \frac{a_{\min j} - a_{\phi j}}{a_{\min j} - a_{\max j}}, \quad (2)$$

где x_j заданы таким образом, что их значения при любых значениях a_{ij} варьируются в пределах от 0 до 1 ($0 \leq x_j \leq 1$), причем $x_j = 0$, если $a_{ij} = a_{\min j}$; $x_j = 1$, если $a_{ij} = a_{\max j}$; $a_{\min j}$ — минимальное значение j -го показателя по блоку; $a_{\max j}$ — максимальное значение j -го показателя по блоку, причем $a_{\max j} \geq 0$; $a_{\phi j}$ — фактическое значение j -го показателя ($a_{\min j} \leq a_{\phi j} \leq a_{\max j}$), $j = \overline{1, m}$.

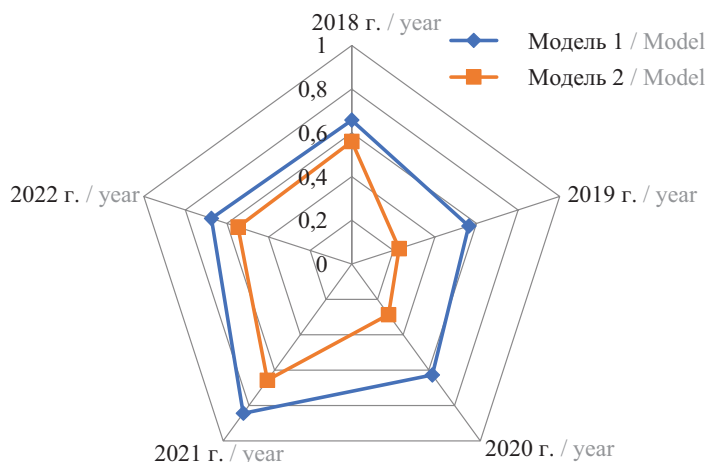


Рис. 8. Визуализация результатов оценки надежности подрядчика АО «Ямалавтодор»

Fig. 8. Visualization of the results of the contractor reliability assessment “Yamalavtodor”

В подходе 2 расчет интегрального критерия определяется через среднее арифметическое значение.

Результаты апробации многокритериальной задачи оценки надежности подрядчика через его ресурсный потенциал на примере сферы дорожно-строительных контрактов представлены в табл. 2. Выбор дорожно-строительной сферы в качестве базы для апробации обосновывается ее важностью для экономики и доступностью информации по контрактам на разработку проектно-сметной документации на строительство линейных объектов, источником финансирования которых выступает государственный бюджет того или иного уровня в интересах общества (государства).

Визуализация полученных результатов комплексной оценки надежности АО «Ямалавтодор» за ретроспективный период наблюдения представлена в виде многоосевой диаграммы на рис. 8.

По результатам комплексной оценки надежности подрядчика на примере АО «Ямалавтодор» по предложенной методике с позиции заказчика следует признать наиболее благоприятным период 2021 г., на который пришелся оптимальный уровень соответствия заданных критериев по формализованным моделям. При этом не исключается возможность применения экспертами иных подходов к формализации критериальной системы. Заключительным этапом формирования реестра надежного подрядчика является его представление в табличной форме, позволяющей значительно упростить восприятие результатов рейтингования и использование конкурсной комиссией при подведении итогов конкурсных торгов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило актуальность и практическую значимость формирования реестра надежности подрядчика в качестве необходимой меры для повышения прозрачности и доверия на рынке СМР. В ходе изучения вопросов по исследуемой проблеме выявлены основные характеристики реестра надежности подрядной организации на государственных закупках через конкурсы, процесса его формирования и базовых алгоритмов, раскрывающих их содержательные аспекты. Обоснована возможность выбора цифровой платформы Rusprofile в качестве информационной базы для формирования реестра надежности подрядной организации с применением расширенной критериальной системы оценки заявителя — конкурсанта. Совершенствование действующей цифровой платформы позволит сократить временные, финансовые и трудовые ресурсы Минстроя РФ на запуск реестра. Представлены разработанные базовые алгоритмы: формирования реестра надежности подрядной организации на государственных закупках через конкурсы; оценки надежности подрядчика на государственных закупках через конкурсы. Ключевым критерием оценки конкурентоспособности предприятия следует признать

его надежность с позиций исполнения договорных (контрактных) обязательств, для обеспечения которой первостепенное значение имеет ресурсный потенциал подрядчика. В ходе исследования обобщены и систематизированы основные критерии для формирования реестра надежности подрядчика с детализацией их информационных источников.

Предложены варианты формализации интегрального показателя надежности подрядчика, алгоритм формирования реестра надежности подрядной организации на государственных закупках через конкурсы с последующим рейтингованием участников, вне зависимости от формализации интегрального показателя надежности подрядчика и визуализации реестра в табличной форме. Представлены результаты апробации многокритериальной задачи оценки надежности подрядчика через его ресурсный потенциал в сфере дорожно-строительных контрактов. Очевидно, что применение комплексного подхода усиливает обоснованность результатов использования аналитического и/или экспертного методов в оценке надежности подрядчика (застройщика, генерального подрядчика), обеспечивая заказчику надежность и вероятность исполнения контракта в срок.

Комплексный подход к определению критериев оценки позволит не только снизить риски для заказчиков при выборе подрядчика и вероятность возникновения проблем в процессе строительства и последующей эксплуатации объектов, но и стимулировать подрядчиков к повышению эффективности функционирования, что даст возможность экономить время и ресурсы, улучшить качество строительных работ и повысить результаты финансово-хозяйственной деятельности. Важно, чтобы процесс был предельно прозрачным и сбалансированным, учитывая интересы всех участников тендерных закупок. Формирование и ведение реестра должно основываться на принципах объективности, прозрачности, независимости, актуальности, добровольности, ответственности и конфиденциальности. Включение в реестр должно быть основано на четких и проверяемых критериях, отражающих различные аспекты деятельности подрядчика.

Реализация идеи создания реестра надежности подрядчика требует проработки множества организационных, юридических и технических вопросов. Следует учитывать опыт других стран в формировании подобных реестров. Необходимо обеспечить регулярное обновление и актуализацию информации в реестре, а также предусмотреть механизмы исключения подрядчиков из реестра в случае выявления нарушений или снижения показателей надежности. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку конкретных механизмов формирования и ведения реестра, определение оптимальных критериев включения в него, а также оценку эффективности функционирования реестра в реальных условиях рынка СМР.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гусакова Е.А., Павлов А.С. Государственные закупки в строительстве — зарубежная практика // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 2. С. 242–252. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.2.242-252. EDN PEXHQW.
2. Жигит А.А., Хамидуллина К.И., Лашкин С.А. Комплексная оценка проведения электронного аукциона при проведении государственных закупок услуг (на примере строительного подряда) // Russian Economic Bulletin. 2020. Т. 3. № 1. С. 68–74. EDN GMPXZP.
3. Кауфова Ф.Б. Проблемы контрактной системы государственных закупок и пути совершенствования законодательства // Молодой ученый. 2017. № 50 (184). С. 296–298. EDN ZXOVPV.
4. Парфильева Е.Н., Нуруллина А.И. Анализ контрактной системы в сфере государственных закупок за рубежом // Вопросы экономики и управления. 2018. № 1 (12). С. 14–17. EDN YMEHML.
5. Смотрицкая И.И. Контрактная система закупки в контексте российских реформ // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2019. № 6. С. 9–25. DOI: 10.24411/2073-6487-2019-10067. EDN DZZCGA.
6. Юзович Л.И., Исакова Н.Ю., Истомина Ю.В., Харжавин К.Е., Гоголина И.Н. Система государственных закупок: теоретический и практический аспекты : монография. Екатеринбург : Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2019. 233 с. EDN QHVOXI.
7. Федорова И.Ю., Пития Ю.С. Организация системы государственных закупок в Японии и возможности опыта их применения в России // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2021. Т. 12. № 1. С. 34–55. DOI: 10.18184/2079-4665.2021.12.1.34-55. EDN UKNIOL.
8. Герасимов В.В., Черниченко А.А., Улитко Е.В., Исаков А.К. Оценка безопасности мегапроекта развития строительного комплекса // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 8 (728). С. 96–103. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-728-8-96-103. EDN JXXTDZ.
9. Martin L., Benson L. Relationship quality in construction projects: A subcontractor perspective of principal contractor relationships // International Journal of Project Management. 2021. Vol. 39. Issue 6. Pp. 633–645. DOI: 10.1016/j.ijproman.2021.05.002
10. Cheaitou A., Larbi R., Housani B.A. Decision making framework for tender evaluation and contractor selection in public organizations with risk considerations // Socio-Economic Planning Sciences. 2019. Vol. 68. P. 100620. DOI: 10.1016/j.seps.2018.02.007
11. Gallego J., Rivero G., Martinez J. Preventing rather than punishing: An early warning model of malfeasance in public procurement // International Journal of Forecasting. 2021. Vol. 37. Issue 1. Pp. 360–377. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2020.06.006
12. Khoso A.R., Yusof A.M., Chen Z-S., Skibniewski M.J., Chin K.S., Khahro S.H. et al. Comprehensive analysis of state-of-the-art contractor selection models in construction environment : a critical review and future call // Socio-Economic Planning Sciences. 2022. Vol. 79. P. 101137. DOI: 10.1016/j.seps.2021.101137
13. Maréchal F., Morand P.H. Are social and environmental clauses a tool for favoritism? Analysis of French public procurement contracts // European Journal of Political Economy. 2022. Vol. 73. P. 102140. DOI: 10.1016/j.ejpoleco.2021.102140
14. Owusu E.K., Chan A.P.C., Ameyaw E. Toward a cleaner project procurement: Evaluation of construction projects' vulnerability to corruption in developing countries // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 216. Pp. 394–407. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.124
15. Васильев В.Д. Оптимизационный подход к выбору инвестиционных стратегий и проектов в строительстве объектов региона : монография. СПб. : Изд-во СПбГУЭФ, 2004. 287 с. EDN QQHNGI.
16. Малыхин В.И. Математика в экономике. М. : Инфра-М, 1999. 356 с.
17. Трухаев Р.И. Модели принятия решений в условиях неопределенности. М. : Наука, 1981. 257 с.
18. Макаров А.Н., Малькова А.С. Оценка рисков строительного проекта на стадии заключения договора подряда // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 12 (780). С. 62–75. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-780-12-62-75. EDN MIJXSO.
19. Кашина Е.В., Берг Т.И. Специфика управления эффективностью бизнеса в строительстве // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 8 (764). С. 119–126. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-764-8-119-126. EDN ERPCRS.

Поступила в редакцию 20 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 20 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 27 мая 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Лариса Акрамовна Филимонова** — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры управления строительством и ЖКХ, Строительный институт; Тюменский индустриальный университет

(ТГУ); 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, д. 2; SPIN-код: 7898-3811, РИНЦ ID: 253819, Scopus: 57199420080, ORCID: 0000-0002-9510-6195; filimonova@tyuiu.ru;

Елена Николаевна Юзе — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры управления строительством и ЖКХ, Строительный институт; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, д. 2; РИНЦ ID: 487155, Scopus: 58700023900, ORCID: 0009-0005-0404-8719; juzeen@tyuiu.ru;

Александр Владимирович Воронин — доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры экономики и организации производства, Институт сервиса и отраслевого управления; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, д. 2; РИНЦ ID: 698551, Scopus: 57196089774, ResearcherID: ADS-5118-2022, ORCID: 0000-0003-2667-6626; voroninav@tyuiu.ru;

Ольга Александровна Жигунова — доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры управления строительством и ЖКХ, Строительный институт; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, д. 2; SPIN-код: 7814-8705, РИНЦ ID: 321782, ORCID: 0009-0001-5678-6116; zhigunova@tyuiu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Gusakova E.A., Pavlov A.S. Public procurement in construction: international practice. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(2):242-252. DOI: 10.22227/1997-0935. 2022.2.242-252. EDN PEXHQW. (rus.).
2. Zhigit A.A., Khamidullina K.I., Lashkin S.A. Comprehensive evaluation of electronic auction at the purchase of public services purchases (on the example of construction contract). *Russian Economic Bulletin*. 2020; 3(1):68-74. EDN GMPXZP. (rus.).
3. Kaufova F.B. Problems of the contract system of public procurement and ways to improve legislation. *Young Scientist*. 2017; 50(184):296-298. EDN ZXOVPV. (rus.).
4. Parfil'eva E.N., Nurullina A.I. Analysis of the contract system in the sphere of public procurement abroad. *Issues of Economics and Management*. 2018; 1(12):14-17. EDN YMEHML. (rus.).
5. Smotritskaya I.I. Contract procurement system in the context of russian reforms. *Vestnik Instituta Ekonomiki Rossiyskoy Akademii Nauk*. 2019; 6:9-25. DOI: 10.24411/2073-6487-2019-10067. EDN DZZCGA. (rus.).
6. Yuzvovich L.I., Isakova N.Yu., Istomina Yu.V., Kharzhavin K.E., Gogolina I.N. *The system of public procurement: theoretical and practical aspects: monograph*. Ekaterinburg, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 2019; 233. EDN QHVOXI. (rus.).
7. Fedorova I.Yu., Pipiya Yu.S. Organization of the public procurement system in Japan and the possibilities of experience of their application in Russia. *MIR (Modernization. Innovation. Research)*. 2021; 12(1):34-55. DOI: 10.18184/2079-4665.2021.12.1.34-55. EDN UKNIOL. (rus.).
8. Gerasimov V.V., Chernichenko A.A., Ulitko E.V., Isakov A.K. Safety assessment of a mega project development in construction industry. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2019; 8(728):96-103. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-728-8-96-103. EDN JXXTDZ. (rus.).
9. Martin L., Benson L. Relationship quality in construction projects: A subcontractor perspective of principal contractor relationships. *International Journal of Project Management*. 2021; 39(6):633-645. DOI: 10.1016/j.ijproman.2021.05.002
10. Cheaitou A., Larbi R., Housani B.A. Decision making framework for tender evaluation and contractor selection in public organizations with risk considerations. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2019; 68:100620. DOI: 10.1016/j.seps.2018.02.007
11. Gallego J., Rivero G., Martinez J. Preventing rather than punishing: An early warning model of malfeasance in public procurement. *International Journal of Forecasting*. 2021; 37(1):360-377. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2020.06.006
12. Khoso A.R., Yusof A.M., Chen Z.-S., Skibniewski M.J., Chin K.S., Khahro S.H. et al. Comprehensive analysis of state-of-the-art contractor selection models in construction environment: a critical review and future call. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2022; 79:101137. DOI: 10.1016/j.seps.2021.101137
13. Maréchal F., Morand P.H. Are social and environmental clauses a tool for favoritism? Analysis of French public procurement contracts. *European Journal of Political Economy*. 2022; 73:102140. DOI: 10.1016/j.ejpoleco.2021.102140
14. Owusu E.K., Chan A.P.C., Ameyaw E. Toward a cleaner project procurement: Evaluation of construction projects' vulnerability to corruption in developing countries. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 216:394-407. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.124
15. Vasil'ev V.D. *Optimization approach to the selection of investment strategies and projects in the construction of regional facilities*. St. Petersburg, St.PSUE, 2004; 287. EDN QQHNGI. (rus.).

16. Malykhin V.I. *Mathematics in economics*. Moscow, Infra-M, 1999; 356. (rus.).
17. Trukhaev R.I. *Models of decision-making under conditions of uncertainty*. Moscow, Nauka, 1981; 257. (rus.).
18. Makarov A.N., Malkova A.S. Risk assessment of a construction project at the stage of conclusion of a contract. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2023; 12(780):62-75. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-780-12-62-75. EDN MIJXSO. (rus.).
19. Kashina E.V., Berg T.I. Specifics of business management in construction. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2022; 8(764):119-126. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-764-8-119-126. EDN ERPCRS. (rus.).

Received March 20, 2025.

Adopted in revised form on May 20, 2025.

Approved for publication on May 27, 2025.

B I O N O T E S: **Larisa A. Filimonova** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Management and Housing and Public Utilities, Construction Institute; **Tyumen Industrial University (TIU)**; 2 Lunacharsky st., Tyumen, 625001, Russian Federation; SPIN-code: 7898-3811, ID RSCI: 253819, Scopus: 57199420080, ORCID: 0000-0002-9510-6195; filimonovala@tyuiu.ru;

Elena N. Yuze — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Management and Housing and Public Utilities, Construction Institute; **Tyumen Industrial University (TIU)**; 2 Lunacharsky st., Tyumen, 625001, Russian Federation; ID RSCI: 487155, Scopus: 58700023900, ORCID: 0009-0005-0404-8719; juzeen@tyuiu.ru;

Aleksandr V. Voronin — Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Department of Economics and Organization of Production, Institute of Service and Industry Management; **Tyumen Industrial University (TIU)**; 2 Lunacharsky st., Tyumen, 625001, Russian Federation; ID RSCI: 698551, Scopus: 57196089774, ResearcherID: ADS-5118-2022, ORCID: 0000-0003-2667-6626; voroninav@tyuiu.ru;

Olga A. Zhigunova — Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Construction Management and Housing and Public Utilities, Construction Institute; **Tyumen Industrial University (TIU)**; 2 Lunacharsky st., Tyumen, 625001, Russian Federation; SPIN-code: 7814-8705, ID RSCI: 321782, ORCID: 0009-0001-5678-6116; zhigunovaoa@tyuiu.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 681.5

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.957-966

Управление жизненным циклом жилых зданий и инфраструктурных объектов в проектах комплексного развития территорий

Любовь Андреевна Адамцевич

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель исследования — анализ взаимосвязи стратегии комплексного развития территорий (КРТ) и методологии управления жизненным циклом (УЖЦ) объектов строительства, раскрытие их синергетического потенциала, включая выявление механизмов и технологий, через которые эти подходы могут дополнять друг друга, формируя базис для устойчивых, технологически современных и социально ориентированных пространств в условиях современных урбанистических вызовов.

Материалы и методы. Выполнен анализ научных публикаций, представленных в РИНЦ, за период с 2021 по 2025 г.

Результаты. Проанализирован международный и российский опыт КРТ, определены основные перспективные технологии при управлении жизненным циклом объектов строительства в условиях цифровой трансформации строительной отрасли, выявлена взаимосвязь КРТ и УЖЦ жилых зданий и инфраструктурных объектов.

Выводы. Ключевые аспекты взаимосвязи стратегии КРТ и методологии УЖЦ объектов строительства: необходимость обеспечения интеграции долгосрочного планирования развития территорий с учетом динамически изменяющихся потребностей социума; сохранение баланса между технологической модернизацией объектов строительства и сохранением ключевых подходов устойчивого развития городов; обеспечение преемственности этапов проектирования, строительства и эксплуатации объектов строительства в контексте устойчивого развития. Выявлены механизмы и технологии, комплексное применение которых позволит обеспечить наилучшую синергию КРТ и методологии УЖЦ, к которым можно отнести: использование предиктивной аналитики и интернета вещей; внедрение цифровых двойников; применение технологий информационного моделирования и прочее. Кроме того, в рамках реализации проектов КРТ важными являются такие направления, как обеспечение населения жильем, рабочими местами, социальной, дорожной и инженерной инфраструктурой. При этом рассматривать эти аспекты целесообразно в рамках трех видов КРТ: комплексного развития территории жилой застройки; комплексного развития нежилой застройки; комплексного развития незастроенной территории.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: КРТ, комплексное развитие территорий, управление жизненным циклом, объект строительства, Индустрия 4.0, интернет вещей, технологии информационного моделирования, предиктивная аналитика, цифровые двойники

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Адамцевич Л.А. Управление жизненным циклом жилых зданий и инфраструктурных объектов в проектах комплексного развития территорий // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 6. С. 957–966. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.957-966

Автор, ответственный за переписку: Любовь Андреевна Адамцевич, AdamtsevichLA@mgsu.ru.

Life cycle management of residential buildings and infrastructure facilities in projects of integrated development of territories

Liubov A. Adamtsevich

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

ABSTRACT

Introduction. The purpose of this paper is to analyze the relationship between the strategy of integrated territorial development and the methodology of life cycle management of construction projects.

Materials and methods. To achieve the goal of the study, an analysis of scientific publications presented in the RSCI for the period from 2021 to 2025 was conducted.

Results. International and Russian experience in integrated territorial development was analyzed, the main promising technologies for managing the life cycle of construction projects in the context of digital transformation of the construction industry were identified, the relationship between integrated territorial development and life cycle management of residential buildings and infrastructure facilities was revealed.

Conclusions. The key aspects of the relationship between the integrated territorial development strategy and the life cycle management methodology for construction projects, among which the key ones are the need to ensure the integration of long-term territorial development planning taking into account the dynamically changing needs of society; maintaining a balance between the technological modernization of construction projects and preserving the key approaches to sustainable urban development; ensuring the continuity of the stages of design, construction and operation of construction projects in the context of sustainable development. The mechanisms and technologies have been identified, the integrated application of which will ensure the best synergy of the IDT and the LCM methodology, which include: the use of predictive analytics and the Internet of Things, digital twins, information modeling technologies, etc. In addition, within the framework of the implementation of integrated territorial development projects, such areas as providing the population with housing, jobs, social, road and engineering infrastructure are important. In this case, it is advisable to consider these aspects within the framework of three types of IDT: integrated development of residential development areas; integrated development of non-residential development; integrated development of undeveloped areas.

KEYWORDS: KRT, integrated development of territories, life cycle management, construction object, Industry 4.0, Internet of Things, information modeling technologies, predictive analytics, digital twins

FOR CITATION: Adamtsevich L.A. Life cycle management of residential buildings and infrastructure facilities in projects of integrated development of territories. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(6):957-966. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.957-966 (rus.).

Corresponding author: Liubov A. Adamtsevich, AdamtsevichLA@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

По состоянию на 1 января 2025 г. доля городского населения в России составила 75,2 %, т.е. 109,8 млн чел. При этом уровень урбанизации по субъектам, по данным Росстата, различается. К наиболее урбанизированным регионам России относятся города федерального значения, такие как Москва — 100 %; Санкт-Петербург — 100 %; Севастополь — 92,6 %.

Среди остальных субъектов РФ по доле городских жителей выделяются: Магаданская область — 96,6 %; Мурманская область — 93 %; Ханты-Мансийский автономный округ – Югра — 92,4 %.

Рост урбанизации приводит к необходимости обеспечения устойчивого развития городов, подразумевающего «развитие, которое удовлетворяет потребности поколения людей, не создавая угроз будущим поколениям при удовлетворении собственных потребностей» [1].

При этом ключевыми задачами на этом пути являются обеспечение достойного места жительства, рабочими местами, комфортной среды жизнедеятельности, развитой инфраструктуры и прочее [1], что во многом пересекается с программой комплексного развития территорий.

Комплексное развитие территорий (КРТ) — государственная программа, ориентированная на преобразование городских пространств с целью повышения качества жизни граждан и стимулирования экономического роста.

В настоящее время программа реализуется по двум основным направлениям:

- реконструкция или снос объектов недвижимости, не отвечающих современным требованиям комфорта и безопасности;
- строительство новых жилых объектов и инфраструктуры, благоустройство территорий.

Выделяют три вида КРТ:

- комплексное развитие территории жилой застройки;

- комплексное развитие нежилкой застройки;
- комплексное развитие незастроенной территории.

Комплексное развитие территорий — одно из ключевых направлений градостроительного развития России. Возможность применения механизмов КРТ рассматривается в 84 регионах страны в отношении свыше 1 тыс. территорий, потенциал строительства оценивается в 181 млн м² недвижимости, включая 131 млн м² жилья.

В то же время совершенствование системы управления жизненным циклом (УЖЦ) жилой застройки и объектов инфраструктуры [2] с помощью технологий Индустрии 4.0 позволит реализовать ряд главных аспектов в проектах КРТ.

Цель настоящего исследования — анализ взаимосвязи стратегии КРТ и методологии УЖЦ объектов строительства, а также раскрытие их синергетического потенциала, включая выявление механизмов и технологий, через которые эти подходы могут дополнять друг друга, формируя базис для устойчивых, технологически современных и социально ориентированных пространств в условиях современных урбанистических вызовов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Понятие «комплексное развитие территории» введено Федеральным законом от 30.12.2020 № 494-ФЗ «О внесении изменений в Градостроительный кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в целях обеспечения комплексного развития территорий» [3].

При этом в СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01–89*» под КРТ принимается совокупность мероприятий, выполняемых в соответствии с утвержденной документацией по планировке территории и направленных на создание благоприятных условий проживания граждан, обновление среды

жизнедеятельности и территорий общего пользования поселений, городских округов.

В настоящее время в национальной библиографической базе данных научного цитирования (РИНЦ) по ключевому словосочетанию «комплексное развитие территорий» отображается 18 599 публикаций (рис. 1). Поиск осуществлялся в названиях публикаций, аннотациях, ключевых словах и полном тексте публикации в статьях, в журналах, книгах, материалах конференций, диссертациях и отчетах. Период поиска ограничен с 2021 по 2025 г.

Как видно из рис. 1, сохраняется значительный интерес к вопросу реализации проектов КРТ. При этом стоит отметить, что в фокусе авторов как во-

просы государственного регулирования и существующие программы поддержки [4–6], так и аспекты технологической трансформации [7, 8], в первую очередь, цифровизация для прогнозирования и оптимизации инфраструктуры в проектах КРТ [9, 10] и прочее.

Если рассматривать методологию УЖЦ объектов строительства, то здесь нет устоявшегося словосочетания, по которому целесообразно делать подборку публикаций, поскольку авторы, как правило, используют несколько подходов [11–15] по формированию понятий в области УЖЦ объекта капитального строительства (ОКС).

В статье под ЖЦ объекта строительства будут приниматься этапы ЖЦ в соответствии с СП

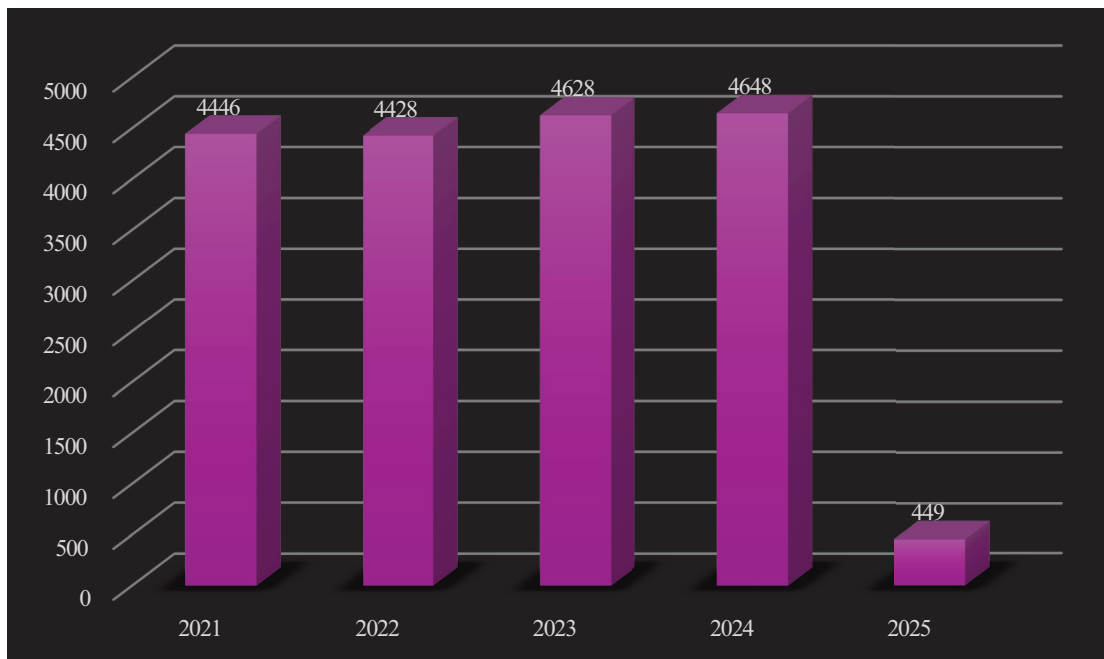


Рис. 1. Динамика изменения количества публикаций по ключевому словосочетанию «комплексное развитие территорий» в РИНЦ за период 2021–2025 гг. по состоянию на май 2025 г.

Fig. 1. Dynamics of changes in the number of publications for the keyword combination “integrated development of territories” in the RSCI for the period 2021–2025 as of May 2025



Рис. 2. Этапы жизненного цикла объекта строительства

Fig. 2. Stages of the life cycle of a construction project

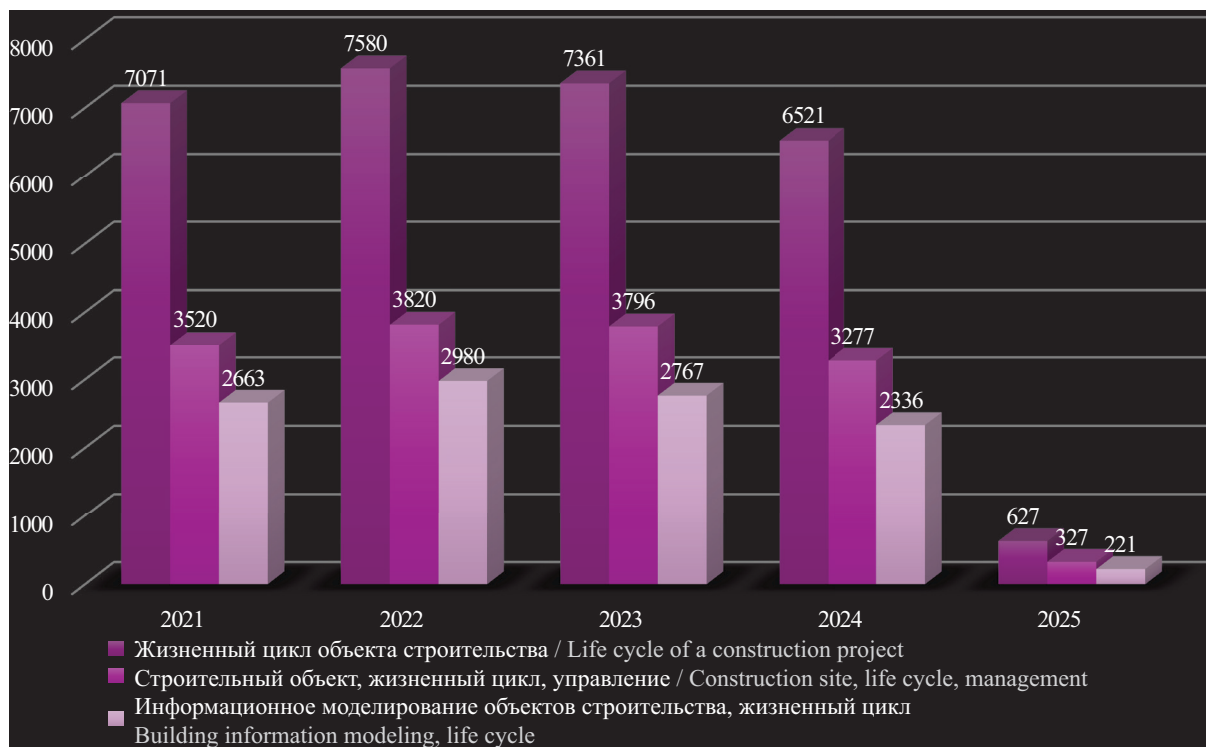


Рис. 3. Динамика изменения количества публикаций по ключевым словосочетаниям в области УЖЦ объектов строительства в РИНЦ за период 2021–2025 гг. по состоянию на май 2025 г.

Fig. 3. Dynamics of changes in the number of publications by keywords in the field of life cycle management of construction projects in the RSCI for the period 2021–2025 as of May 2025

333.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла», в котором под этапами ЖЦ ОКС принимаются «временные периоды, в течение которых осуществляются инженерные изыскания, архитектурно-строительное проектирование (включая прохождение экспертизы), строительство (включая ввод в эксплуатацию), эксплуатация (включая текущие ремонты), реконструкция, капитальный ремонт, снос и утилизация» ОКС (рис. 2).

Для анализа тенденций развития научных исследований в области УЖЦ жилых зданий и инфраструктурных объектов выбраны следующие словосочетания: жизненный цикл объекта строительства; строительный объект, жизненный цикл, управление; информационное моделирование объектов строительства, жизненный цикл (рис. 3).

Условия поиска приняты аналогичные при поиске публикаций для проектов КРТ.

Как видно из рис. 3, наиболее популярным является словосочетание «жизненный цикл объекта строительства».

Подробный обзор существующих технологий Индустрии 4.0 в строительной отрасли представлен в работе [16]. При этом стоит отметить, что описанные в статье технологии не потеряли своей актуальности и сегодня и могут быть эффективно ис-

пользованы при реализации проектов КРТ с учетом методологии УЖЦ объектов строительства.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенное исследование позволило выявить следующее.

Международный и российский опыт комплексного развития территорий

В настоящее время комплексному освоению территорий уделено много внимания как в России, так и за рубежом. За рубежом данный процесс начался чуть ранее. Наиболее известными проектами за рубежом считаются проекты HafenCity [17] в Германии, Canary Wharf [18, 19] в Великобритании, Кор ван Zuid в Нидерландах, Docklands [20–22] в Австралии и Songdo International Business District [23, 24] в Южной Кореи¹.

Проект Hafen City представляет собой крупнейший в Европе проект реконструкции городской территории 220 га, который превратил территорию, бывшую портовым районом Гроссер Грасбрук, в современный многофункциональный район с жилыми домами, офисами, отелями, культурными объектами и магазинами. По информации застройщика к завершению проекта на территории Hafen City будет про-

¹ Проекты комплексного освоения территорий со всего мира // CRE. URL: <https://cre.ru/analytics/31412>

живать более 12 000 человек, обеспечены работой 40 000 чел. Планируется, что проект станет символом успешной трансформации промышленной зоны в динамически развивающийся урбанистический центр. Общий объем инвестиций в проект оценивается в 6,2 млрд евро.

Проект Canary Wharf возник на месте доков West India Docks, которые с момента своего открытия в 1802 г. были среди самых оживленных мест в мире. Однако с течением времени и развитием научно-технического прогресса в 1980 г. доки окончательно закрыли, территория была выкуплена правительством.

Сегодня Canary Wharf соревнуется с Сити за звание финансового и делового центра Лондона. Основными видами деятельности, представленными в районе, являются банковская сфера, медиасфера и предоставление юридических услуг. Территория проекта оценивается в 40 га, а общий объем инвестиций 6,3 млрд евро.

Проект Kop van Zuid — район Коп ван Зюйд, возведенный на месте старых заброшенных портовых районов вокруг Бинненхавена, Энтрепотхавена, Спурвегхавена, Рейнхавена и пирса Вильгельмина. Эти портовые районы и р. Ньиве-Маас создавали большое физическое расстояние между центром и северной частью Роттердама и южной частью города. В этой связи основной задачей для проектировщиков стал вопрос объединения северной и южной части. Общая площадь проекта оценивается 125 га. Идея реконструкции района зародилась в 1988 г., реализация началась в 1990 г. При этом в целях проекта было не только создать новые рабочие места, но также кардинально изменить имидж всего города.

Проект Docklands занимает площадь 190 га, общий объем инвестиций составляет 17,5 млрд долл. Территория Docklands состоит из четырех районов, по итогам завершения проекта ожидается более 60 000 новых рабочих мест. На месте современного Docklands изначально было болото, которое в 1880-х гг. превратилось в оживленный портовый район в составе Мельбурнского порта с обширной сетью причалов, мощной железнодорожной инфраструктурой и легкой промышленностью. После контейнеризации морских перевозок Docklands пришел в упадок и к 1990 гг. был практически заброшен.

Проект Songdo International Business District считается одним из наиболее амбициозных и зани-

мает площадь 530 га, общий объем инвестиций — 40 млрд долл.

Город построен на насыпном искусственном острове. Общее количество жителей оценивается в 700 000 жителей. Целью реализации проекта Songdo International Business District было создание нового города международного уровня с использованием современных цифровых технологий.

Одна из сильных сторон города — передовая транспортная система: для пешеходов по всему городу проложены тротуары и велосипедные дорожки; транспортная сеть города включает сеть автономных автобусов-шаттлов, работающих от электричества, и парк электрических такси, которые могут быть вызваны с помощью приложения для смартфона.

Отличительной особенностью города служит сложная система управления отходами, где каждое здание оборудовано системой сбора и сортировки отходов.

В России наиболее известна Московская программа комплексного развития территорий, при реализации которой стало доступно более 898 000 новых рабочих мест, а общая территория оценивается в 4,2 тыс. га. Реализация проектов КРТ в Москве позволяет создать новые зоны роста для бизнеса и точки притяжения для жителей города. Реализованные проекты КРТ представлены на официальном сайте программы².

Управление жизненным циклом объектов строительства в условиях цифровой трансформации строительной отрасли

Проведенное исследование позволило выявить возможность повышения эффективности УЖЦ жилых зданий и инфраструктурных объектов с применением технологий Индустрии 4.0 [25–32]. В табл. 1 представлена взаимосвязь основных этапов ЖЦ и перспективных технологий.

Взаимосвязь комплексного развития территорий и управления жизненным циклом жилых зданий и инфраструктурных объектов

Проведенный анализ позволил выявить общие черты программы КРТ и методологии УЖЦ, к которым можно отнести системный подход, долгосроч-

² Официальный сайт Московской программы комплексного развития территорий. URL: <https://krt.mos.ru/projects/>

Табл. 1. Взаимосвязь основных этапов ЖЦ и перспективных технологий Индустрии 4.0

Table 1. Interrelation between the main stages of the life cycle and promising technologies of Industry 4.0

Этап ЖЦ Life Cycle Stage	Основные технологии Индустрии 4.0 Key technologies of Industry 4.0	Назначение Purpose
Проектирование Design	ВМ или технологии информационного моделирования / BIM	Моделирование строительных объектов с учетом данных о материалах, стоимости и сроках строительства / Modeling of construction projects taking into account data on materials, cost and construction time

Этап ЖЦ Life Cycle Stage	Основные технологии Индустрии 4.0 Key technologies of Industry 4.0	Назначение Purpose
Проектирование Design	Цифровые двойники / Digital Twins	Разработка виртуальных копий объекта для симуляции различных сценариев / Development of virtual copies of the object to simulate various scenarios
	Искусственный интеллект Artificial Intelligence	Прогнозирование нагрузок, генерация проектных решений Forecasting loads, generating design solutions
Строительство Construction	3D-печать 3D Concrete Printing	Сокращение сроков возведения объектов, минимизация отходов Reducing construction time, minimizing waste
	Дроны / Drones	Мониторинг строительной площадки / Monitoring the construction site
	Роботы / Robots	Повышение точности и безопасности строительных работ Increasing the accuracy and safety of construction work
Эксплуатация Operation	Умные энергосети Smart Grids	Автоматическое управление энергопотреблением Automatic energy management
	Автономные системы Autonomous Systems	Сокращение затрат на ЖКХ / Reducing housing and communal services costs
	Предиктивная аналитика Predictive Analytics	Прогноз износа конструкций для обеспечения своевременного ремонта / Forecasting the wear of the structure to ensure timely repairs
Снос и утилизация Demolition and disposal	Роботы для разборки зданий Building Demolition Robots	Обеспечение безопасного демонтажа объекта строительства и сортировки отходов / Ensuring safe dismantling of the construction site and waste sorting
	Искусственный интеллект Artificial Intelligence	Обеспечение автоматической оптимизации переработки строительных отходов за счет интеллектуального анализа отходов / Ensuring automatic optimization of construction waste recycling through intelligent waste analysis

ную перспективу, использование цифровых технологий и обеспечение устойчивого развития.

Наличие системного подхода обеспечивается в КРТ за счет того, что территория рассматривается как единая система, включающая в себя обеспечение населения жильем, рабочими местами, социальной, дорожной и инженерной инфраструктурой. В методологии УЖЦ объект строительства рассматривается на всех этапах ЖЦ от проектирования до утилизации.

КРТ планирует развитие территории на десятилетия вперед, УЖЦ направлено на оптимизацию затрат на эксплуатацию зданий на 50 лет и более.

При этом ключевыми точками пересечения видятся: интеграция технологий информационного моделирования и ГИС при планировании развития

территории, проектирование долгосрочных инженерных сетей и оценка остаточного ресурса зданий при редевелопменте.

К основным инструментам интеграции КРТ и УЖЦ можно отнести информационное моделирование зданий и реализацию цифровых двойников территорий.

Устойчивость развития создается за счет обеспечения энергоэффективности зданий и сооружений, цифровизации и интеллектуального управления, минимизации отходов и прочего.

В то же время выявлен ряд различий (табл. 2).

Таким образом, УЖЦ ориентировано на микроуровень, а КРТ на макроуровень, однако можно говорить о возможности комплексного использования подходов для достижения максимального синерге-

Табл. 2. Ключевые отличия программы КРТ и методологии УЖЦ

Table 2. Key differences between the integrated development of territories program and the life cycle management methodology

Критерий различия Criterion of distinction	КРТ / IDT	УЖЦ / LCM
Объект управления Object of management	Территория (кварталы, районы, города) Territory (districts, areas, cities)	Отдельные здания и сооружения, инженерные объекты / Individual buildings and structures, engineering facilities
Цель / Purpose	Обеспечение сбалансированного развития инфраструктуры, экономики и населения Ensuring balanced development of infrastructure, economy and population	Минимизация затрат на ЖЦ объекта строительства / Minimization of life cycle costs of a construction facility

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Критерий различия Criterion of distinction	КРТ / IDT	УЖЦ / LCM
Методы / Methods	Градостроительное зонирование, моделирование / Urban zoning, modeling	Стоимость жизненного цикла (LCC-анализ), методы предиктивной аналитики / Life cycle cost (LCC analysis), predictive analytics methods
Сроки / Terms	Долгосрочное планирование Long-term planning	Полный цикл объекта (все этапы ЖЦ) Full facility cycle (all life cycle stages)

тического эффекта. Например, реализация проекта реновации промзоны с применением технологий информационного моделирования и прочего.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ позволил выявить основные аспекты взаимосвязи стратегии комплексного развития территорий и методологии управления жизненным циклом объектов строительства, среди которых ключевыми являются следующие:

- необходимость обеспечения интеграции долгосрочного планирования развития территорий с учетом динамически изменяющихся потребностей социума;
- сохранение баланса между технологической модернизацией объектов строительства и сохранением ключевых подходов устойчивого развития городов;
- обеспечение преемственности этапов проектирования, строительства и эксплуатации объектов строительства в контексте устойчивого развития.

Кроме того, определены механизмы и технологии, комплексное применение которых даст возмож-

ность обеспечить наилучшую синергию КРТ и методологии УЖЦ, к которым можно отнести:

- использование предиктивной аналитики и интернета вещей для оптимизации ресурсопотребления в проектах КРТ;
- внедрение цифровых двойников для анализа возможных сценариев развития территорий;
- применение технологий информационного моделирования для обеспечения взаимосвязи данных, процессов и участников проекта КРТ и прочее.

Стоит также отметить, что в рамках реализации проектов КРТ важными являются такие направления, как обеспечение населения жильем, рабочими местами, социальной, дорожной и инженерной инфраструктурой.

При этом рассматривать эти аспекты целесообразно в рамках трех направлений:

- комплексного развития территории жилой застройки;
- комплексного развития нежилой застройки;
- комплексного развития незастроенной территории.

Данному вопросу будут посвящены дальнейшие публикации автора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Каширинур М.М.* Применение концепции устойчивого развития в городской структуре // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 1. С. 35–49. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-1-35-49. EDN ZKCOGX.

2. *Суворова М.О., Наумов А.Е., Строкова В.В.* Совершенствование системы управления жизненным циклом комплексной застройки территорий с позиции низкоуглеродного развития // Строительство и архитектура. 2023. Т. 11. № 2. С. 3. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-2-3-3. EDN YMUZXY.

3. *Кирсанов А.Р.* Виды комплексного развития территорий // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2021. № 4 (235). С. 84–89. EDN ROZHUK.

4. *Кирсанов А.Р.* Комплексное развитие территорий: от глобальных планов к конкретным пробле-

мам // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2022. № 11 (254). С. 35–42. EDN QBGXJK.

5. *Шibaева Н.А.* Комплексное развитие как основа экономического роста и повышения конкурентоспособности территорий // Менеджмент в современном обществе: технологии будущего и наставничество : мат. XXII Междунар. науч.-практ. конф. 2024. С. 280–287. EDN ABDOJF.

6. *Шibaева Н.А., Кательникова М.А.* Комплексное развитие сельских территорий как основа устойчивого развития регионов России // Друковский вестник. 2023. № 2 (52). С. 185–192. DOI: 10.17213/2312-6469-2023-2-185-192. EDN GGLEBE.

7. *Чебакова А.А., Карелин Д.В.* Влияние параметров плотности застройки на комплексное развитие городских территорий // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). 2021. Т. 24. № 1/2 (79/80).

С. 69–75. DOI: 10.32683/1815-5987-2021-24-79/80-1/2-69-75. EDN GHSQPW.

8. *Смыслова О.Ю., Нестерова Н.Н., Иванова А.А., Юрова П.Н.* Комплексное развитие сельских территорий: пространственно-отраслевая и цифровая трансформация // ЭФО: Экономика. Финансы. Общество. 2024. № 1 (9). С. 4–14. DOI: 10.24412/2782-4845-2024-9-4-14. EDN JOMDKU.

9. *Слюсарев К.А.* Использование цифровых технологий в архитектурном проектировании (на примере реализации мероприятий государственной программы «комплексное развитие сельских территорий») // Избранные доклады 69-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых. 2023. С. 536–540. EDN ZVLDDK.

10. *Лаврентьева И.В., Тузов К.А.* Возможность использования больших данных для показателей ГП «комплексное развитие сельских территорий» // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2021. № 38 (43). С. 113–122. EDN YAZOZ.

11. *Федосов С.В., Федосеев В.Н., Зайцева И.А., Воронов В.А.* Управление жизненным циклом устойчивого состояния объекта строительства // Эксперт: теория и практика. 2023. № 3 (22). С. 131–137. DOI: 10.51608/26867818_2023_3_131. EDN ANFIUN.

12. *Жданова М.В., Латидус А.А.* Сокращение продолжительности сроков жизненного цикла строительного проекта // Строительство и архитектура. 2024. Т. 12. № 4 (45). С. 6. DOI: 10.29039/2308-0191-2024-12-4-6-6. EDN CHIANO.

13. *Постнов К.В.* Особенности проектирования и использования цифрового двойника проектной организации // Строительство и архитектура. 2023. Т. 11. № 4. С. 23. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-4-23-23. EDN DMWYAM.

14. *Сафарян Г.Б.* Жизненный цикл объекта строительства как часть строительной системы // Строительное производство. 2023. № 2. С. 62–65. DOI: 10.54950/26585340_2023_2_62. EDN ZFDURO.

15. *Латидус А.А., Федосов С.В., Петрухин А.Б., Кеневи Э.* Цифровое информационное моделирование BIM — одна из возможностей управления жизненным циклом объектов строительства // Строительное производство. 2023. № 4. С. 32–36. DOI: 10.54950/265853402023432. EDN AWXPGA.

16. *Гинзбург А.В., Адамцевич Л.А., Адамцевич А.О.* Строительная отрасль и концепция «Индустрия 4.0»: обзор // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 7. С. 885–911. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.885-911. EDN NWPZGH.

17. *Eleftheriou V., Knieling J.* The urban project of HafenCity. Today's Urban and Traffic profile of the area. Executive summary of methodology and traffic research conducted in the region // Transportation

Research Procedia. 2017. Vol. 24. Pp. 73–80. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.05.070

18. *Harding J.* Observing inclusivity in a crowded London underground station using service design methods // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Municipal Engineer. 2024. Vol. 177. Issue 1. Pp. 25–37. DOI: 10.1680/jmuen.23.00048

19. *Roberts J., Simpson J., Murphy N., Paxman J.* Construction engineering to transform the composite frame of YY London // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Civil Engineering. 2024. Vol. 177. Issue 4. Pp. 187–196. DOI: 10.1680/jcien.24.00918

20. *Doyle A.* Urban resilience: the regeneration of the Dublin Docklands // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Urban Design and Planning. 2016. Vol. 169. Issue 4. Pp. 175–184. DOI: 10.1680/jurdp.15.00038

21. *Song Z., Cao M., Han T., Hickman R.* Public transport accessibility and housing value uplift: Evidence from the Docklands light railway in London // Case Studies on Transport Policy. 2019. Vol. 7. Issue 3. Pp. 607–616. DOI: 10.1016/j.cstp.2019.07.001

22. *Ball R.J., Langdon N.J., Giles D.P.* Impact of the Calder's Wharf development on Docklands Light Railway tunnels, London, UK // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Geotechnical Engineering. 2021. Vol. 174. Issue 4. Pp. 419–429. DOI: 10.1680/jgeen.20.00053

23. *Kim Y., Choi M.J.* Contracting-out public-private partnerships in mega-scale developments: The case of New Songdo City in Korea // Cities. 2018. Vol. 72. Pp. 43–50. DOI: 10.1016/j.cities.2017.07.021

24. *Yigitcanlar T., Han H., Kamruzzaman M., Ioppolo G., Sabatini-Marques J.* The making of smart cities: Are Songdo, Masdar, Amsterdam, San Francisco and Brisbane the best we could build? // Land Use Policy. 2019. Vol. 88. P. 104187. DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.104187

25. *Zhou Y.* AI-driven digital circular economy with material and energy sustainability for industry 4.0 // Energy and AI. 2025. Vol. 20. P. 100508. DOI: 10.1016/j.egyai.2025.100508

26. *Seraj M., Parvez M., Khan O., Yahya Z.* Optimizing smart building energy management systems through industry 4.0: A response surface methodology approach // Green Technologies and Sustainability. 2024. Vol. 2. Issue 2. P. 100079. DOI: 10.1016/j.grets.2024.100079

27. *Bag S., Gupta S., Chan H.-L., Kumar A.* Building smart product-service systems capabilities for circular supply chains in the Industry 4.0 era // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2024. Vol. 188. P. 103625. DOI: 10.1016/j.tre.2024.103625

28. *Jia W., Li S., Wang J., Lee J.T.E., Lin C.S.K., Mašek O. et al.* Sustainable valorisation of food waste into engineered biochars for CO₂ capture towards a circular economy // Green Chemistry. 2024. Vol. 26. Issue 4. Pp. 1790–1805. DOI: 10.1039/d3gc04138g

29. Bosu I., Mahmoud H., Hassan H. Energy audit, techno-economic, and environmental assessment of integrating solar technologies for energy management in a university residential building: A case study // *Applied Energy*. 2023. Vol. 341. P. 121141. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121141

30. Yin X., Liu H., Chen Y., Al-Hussein M. Building information modelling for off-site construction: Review and future directions // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 101. Pp. 72–91. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.01.010

31. Prashar A. A parametric optimization approach for radial shaft seal production processes for rubber waste reduction // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 415. P. 137770. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137770

32. Alijoyo F.A. AI-powered deep learning for sustainable industry 4.0 and internet of things: Enhancing energy management in smart buildings // *Alexandria Engineering Journal*. 2024. Vol. 104. Pp. 409–422. DOI: 10.1016/j.aej.2024.07.110

Поступила в редакцию 20 мая 2025 г.

Принята в доработанном виде 2 июня 2025 г.

Одобрена для публикации 2 июня 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **Любовь Андреевна Адамцевич** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2537-0511; AdamtsevichLA@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Kashiripoor M.M. Application of sustainable development concept to the urban structure. *Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25(1):35-49. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-1-35-49. EDN ZKCOGX. (rus.).

2. Krutilova M., Naumov A., Strokova V. Life cycle low-carbon management system improvement of the integrated development of buildings. *Construction and Architecture*. 2023; 11(2):3. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-2-3-3. EDN YMUZXY. (rus.).

3. Kirsanov A.R. Types of integrated development of territories. *Property Relations in the Russian Federation*. 2021; 4(235):84-89. EDN ROZHUK. (rus.).

4. Kirsanov A.R. Integrated development of territories: from global plans to specific problems. *Property Relations in the Russian Federation*. 2022; 11(254):35-42. EDN QBGXJK. (rus.).

5. Shibaeva N.A. Integrated development as the basis for economic growth and increasing the competitiveness of territories. *Management in modern society: technologies of the future and mentoring : materials of the XXII International scientific and practical conference*. 2024; 280-287. EDN ABDOJF. (rus.).

6. Shibaeva N.A., Katalnikova M.A.I. Integrated development of rural territories as a basis for sustainable development of Russian regions. *Drukerovskij vestnik*. 2023; 2(52):185-192. DOI: 10.17213/2312-6469-2023-2-185-192. EDN GGLEBE. (rus.).

7. Chebakova A.A., Karelin D.V. Influence of building density parameters on the integrated development of urban areas. *Proceedings of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)*. 2021; 24(1/2):(79/80):69-75. DOI:

10.32683/1815-5987-2021-24-79/80-1/2-69-75. EDN GHSQPW. (rus.).

8. Smyslova O.Y., Nesterova N.N., Ivanova A.A., Yurova P.N. Integrated rural development: spatial, sectoral and digital transformation. *EFO: Economics. Finance. Society*. 2024; 1(9):4-14. DOI: 10.24412/2782-4845-2024-9-4-14. EDN JOMDKU. (rus.).

9. Slyusarev K.A. Use of digital technologies in architectural design (on the example of the implementation of activities of the state program “integrated development of rural areas”). *Selected reports of the 69th University Scientific and Technical Conference of Students and Young Scientists*. 2023; 536-540. EDN ZVLDDK. (rus.).

10. Lavrentieva I.V., Tuzov K.A. Possibility of using big data for indicators of the state program “integrated development of rural territories”. *Bulletin of the Russian State Agrarian Correspondence University*. 2021; 38(43):113-122. EDN YAZO EZ. (rus.).

11. Fedosov S.V., Fedoseev V.N., Zayceva I.A., Voronov V.A. Management of the life cycle of a construction facility steady state. *Expert: Theory and Practice*. 2023; 3(22):131-137. DOI: 10.51608/26867818_2023_3_131. EDN AHFIUN. (rus.).

12. Zhdanova M., Lapidus A. Life cycle requirement time optimization of a construction project. *Construction and Architecture*. 2024; 12(4):(45):6. DOI: 10.29039/2308-0191-2024-12-4-6-6. EDN CHIANO. (rus.).

13. Postnov K. Peculiarities of designing and using a digital twin of a design organization. *Construction and Architecture*. 2023; 11(4):23. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-4-23-23. EDN DMWYAM. (rus.).

14. Safaryan G.B. The life cycle of a building object as part of the construction system. *Construction Production*. 2023; 2:62-65. DOI: 10.54950/26585340_2023_2_62. EDN ZFDURO. (rus.).
15. Lapidus A.A., Fedosov S.V., Petrukhin A.B., Kenewei E. Digital information modeling BIM is one of the possibilities of construction objects life cycle management. *Construction Production*. 2023; 4:32-36. DOI: 10.54950/265853402023432. EDN AWXPGA. (rus.).
16. Ginzburg A.V., Adamtsevich L.A., Adamtsevich A.O. Construction industry and the Industry 4.0 concept: a review. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(7):885-911. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.885-911. EDN NWPZGH. (rus.).
17. Eleftheriou V., Knieling J. The urban project of HafenCity. Today's Urban and Traffic profile of the area. Executive summary of methodology and traffic research conducted in the region. *Transportation Research Procedia*. 2017; 24:73-80. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.05.070
18. Harding J. Observing inclusivity in a crowded London underground station using service design methods. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Municipal Engineer*. 2024; 177(1):25-37. DOI: 10.1680/jmuen.23.00048
19. Roberts J., Simpson J., Murphy N., Paxman J. Construction engineering to transform the composite frame of YY London. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Civil Engineering*. 2024; 177(4):187-196. DOI: 10.1680/jcien.24.00918
20. Doyle A. Urban resilience: the regeneration of the Dublin Docklands. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Urban Design and Planning*. 2016; 169(4):175-184. DOI: 10.1680/jurdp.15.00038
21. Song Z., Cao M., Han T., Hickman R. Public transport accessibility and housing value uplift: Evidence from the Docklands light railway in London. *Case Studies on Transport Policy*. 2019; 7(3):607-616. DOI: 10.1016/j.cstp.2019.07.001
22. Ball R.J., Langdon N.J., Giles D.P. Impact of the Calder's Wharf development on Docklands Light Railway tunnels, London, UK. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Geotechnical Engineering*. 2021; 174(4):419-429. DOI: 10.1680/jgeen.20.00053
23. Kim Y., Choi M.J. Contracting-out public-private partnerships in mega-scale developments: The case of New Songdo City in Korea. *Cities*. 2018; 72:43-50. DOI: 10.1016/j.cities.2017.07.021
24. Yigitcanlar T., Han H., Kamruzzaman M., Ioppolo G., Sabatini-Marques J. The making of smart cities: Are Songdo, Masdar, Amsterdam, San Francisco and Brisbane the best we could build? *Land Use Policy*. 2019; 88:104187. DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.104187
25. Zhou Y. AI-driven digital circular economy with material and energy sustainability for industry 4.0. *Energy and AI*. 2025; 20:100508. DOI: 10.1016/j.egyai.2025.100508
26. Seraj M., Parvez M., Khan O., Yahya Z. Optimizing smart building energy management systems through industry 4.0: A response surface methodology approach. *Green Technologies and Sustainability*. 2024; 2(2):100079. DOI: 10.1016/j.grets.2024.100079
27. Bag S., Gupta S., Chan H.-L., Kumar A. Building smart product-service systems capabilities for circular supply chains in the Industry 4.0 era. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2024; 188:103625. DOI: 10.1016/j.tre.2024.103625
28. Jia W., Li S., Wang J., Lee J.T.E., Lin C.S.K., Mašek O. et al. Sustainable valorisation of food waste into engineered biochars for CO₂ capture towards a circular economy. *Green Chemistry*. 2024; 26(4):1790-1805. DOI: 10.1039/d3gc04138g
29. Bosu I., Mahmoud H., Hassan H. Energy audit, techno-economic, and environmental assessment of integrating solar technologies for energy management in a university residential building: A case study. *Applied Energy*. 2023; 341:121141. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121141
30. Yin X., Liu H., Chen Y., Al-Hussein M. Building information modelling for off-site construction: Review and future directions. *Automation in Construction*. 2019; 101:72-91. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.01.010
31. Prashar A. A parametric optimization approach for radial shaft seal production processes for rubber waste reduction. *Journal of Cleaner Production*. 2023; 415:137770. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137770
32. Alijoyo F.A. AI-powered deep learning for sustainable industry 4.0 and internet of things: Enhancing energy management in smart buildings. *Alexandria Engineering Journal*. 2024; 104:409-422. DOI: 10.1016/j.aej.2024.07.110

Received May 20, 2025.

Adopted in revised form on June 2, 2025.

Approved for publication on June 2, 2025.

BIONOTES: Liubov A. Adamtsevich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2537-0511; AdamtsevichLA@mgsu.ru.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовка, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом **IMRaD** и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы (\mathbf{a} , \mathbf{b} и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников *на русском языке* оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников *на английском языке* (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в

тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке источников сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в

статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Вклад авторов: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В.В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bi o n o t e s: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

Contribution of the authors: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д. / conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, supervision etc.) на английском языке.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги руб. коп.

Итого руб. коп. « » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2025 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги руб. коп.

Итого руб. коп. « » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

