

ISSN 1997-0935 (Print)
ISSN 2304-6600 (Online)
vestnikmgsu.ru

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 18 Выпуск 10/2023
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 18. Выпуск 10
2023**

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

Сквозной номер 179

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 18. Issue 10
2023**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 24-76
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	26.10.2023.
Подписан в свет	31.10.2023.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 19,17. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 337

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

Вера Владимировна Галишикова, д-р техн. наук, доц., проф. каф. железобетонных и каменных конструкций, проректор, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

строительный факультет, Республика Польша

Армен Юрьевич Казарян, д-р искусствоведения, академик Российской академии архитектуры и строительных наук, и.о. директора 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., зав. каф. гидравлики и гидротехнического строительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

Левон Рафаэлович 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., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. информатики и прикладной математики, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Редакция журнала

Выпускающий редактор: *Анна Александровна Дядичева*

Редактор: *Татьяна Владимировна Бердникова*

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

Корректор: *Оксана Валерьевна Ермихина*

Дизайн и верстка: *Алина Юрьевна Байкова*

Журнал включен в утвержденный ВАК Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук. Индексируется в РИНЦ, Научной электронной библиотеке «Кибер.Ленинка», 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., зав. 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

Михаил Юрьевич Слесарев, д-р техн. наук, проф., проф. каф. строительства объектов тепловой и атомной энергетики, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	26.10.2023

Distributed by subscription

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)”, 2023

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

Vera V. Galishnikova, 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: *Anna A. Dyadicheva*

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

Mikhail Yu. Slesarev, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, 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

Н.В. Данилина, А.Е. Коробейникова, А.Р. Хазбулатова
Методика построения культурно-общественного каркаса арктических городов на примере г. Салехарда . 1515

А.Г. Левашев
Роль городских транспортных коридоров в формировании агломераций 1532

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

С.А. Соловьев, А.А. Соловьева
Метод вероятностного анализа надежности элементов конструкций на основе граничных функций распределения 1545

В.С. Широков
Влияние податливости внутримодульных узлов на частоту собственных колебаний модульного здания . . 1556

Н.С. Никифорова, Н.С. Семенов
Влияние возрастания характеристик грунтов в основании реконструируемых зданий на их осадку при устройстве подземной части 1563

А.З. Тер-Мартirosян, Г.О. Анжелo, Л.Ю. Ермошина, И.А. Боков, А.В. Манукян
Влияние коэффициента неравномерности расширения грунтового образца на механические характеристики 1574

М.Ю. Трошин, А.В. Турков
Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в пятислойных плитах древесины перекрестно-клееной 1587

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА
И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

А.Л. Суздалева, М.Ю. Слесарев, И.Ю. Яковлева
Опасные геологические процессы на участках объектов незавершенного строительства 1599

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.Л. Торопов
Классификация электрических котлов резистивного нагрева автономных водяных систем теплоснабжения 1608

Н.А. Макиша, В.А. Чухин
Алгоритм проведения обследований систем холодного и горячего водоснабжения жилых зданий 1617

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА.
ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Н.Г. Верстина, Д.З. Искандаров
Реализация государственной политики на основе проектов строительства объектов промышленности в особых экономических зонах 1627

К.Ю. Кулаков, А.К. Орлов, В.С. Канхва
Цепочки создания ценности в строительстве на основе концепции бережливого производства в условиях цифровой трансформации 1647

Требования к оформлению научной статьи 1661

1512

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Nina V. Danilina, Anna E. Korobeinikova, Alina R. Khazbulatova
Methodology of building cultural and public framework of arctic cities on the example of Salekhard city. 1515

Alexey G. Levashev
The role of urban transport corridors in the formation of agglomerations 1532

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

Sergey A. Solovev, Anastasia A. Soloveva
Method of structural reliability analysis based on boundary distribution functions 1545

Viacheslav S. Shirokov
Influence of compliance of intramodular joints on the natural vibrations frequency of a modular building 1556

Nadezhda S. Nikiforova, Nikolai S. Semenov
Influence of increasing soil characteristics at the base of reconstructed buildings on their settlement during the construction of the underground part 1563

Armen Z. Ter-Martirosyan, Georgiy O. Anzhelo, Lyubov Yu. Ermoshina, Ilia A. Bokov, Artur V. Manukyan
Influence of the coefficient of non-uniform expansion of the soil sample on mechanical characteristics. 1574

Mikhail Yu. Troshin, Andrej V. Turkov
Influence of thickness of transverse and longitudinal layers on deformability and stress distribution in five-layer cross-glued wood boards. 1587

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Antonina L. Suzdaleva, Mikhail Yu. Slesarev, Irina Yu. Yakovleva
Hazardous geological processes at incomplete construction sites. 1599

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Alexey L. Toropov
Classification of electric resistive heating boilers for autonomous water heating systems 1608

Nikolay A. Makisha, Valentin A. Chukhin
Survey algorithm for cold and hot water supply systems of residential buildings. 1617

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Natalia G. Verstina, Daler Z. Iskandarov
Realization of state policy on the basis of projects for construction of industrial facilities in special economic zones 1627

Kirill Yu. Kulakov, Aleksandr K. Orlov, Vadim S. Kankhva
Value chains in construction based on the concept of lean manufacturing in the conditions of digital transformation 1647

Requirements for research paper design 1661

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).

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

объявляет о возможности подготовки диссертации на соискание ученой степени доктора наук на тему:

«Методология формирования деловой мобильности восстановления городского жилищного фонда
и коммунальной инфраструктуры в чрезвычайных условиях».

Конкурсный отбор состоится на заседании Научно-технического совета

НИУ МГСУ 21.11.2023 в 14.00.

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 711.558

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1515-1531

Методика построения культурно-общественного каркаса арктических городов на примере г. Салехарда

Нина Васильевна Данилина, Анна Евгеньевна Коробейникова,
Алина Руслановна Хазбулатова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время уделяется большое внимание развитию Арктической зоны Российской Федерации. Повышенный интерес связан не только с открытием Северного морского пути, но и с большим экономическим, социальным, сырьевым и туристическим потенциалом территории. Развитие арктического города невозможно без учета его общественных пространств, их состояния и связности. Именно неразрывность культурных, исторических и природных объектов города позволяет создать устойчивый, способный к развитию культурно-общественный каркас (КОК).

Материалы и методы. Проведен анализ культурных, исторических и природных объектов арктических городов, использованы современные ГИС-технологии для моделирования КОК, в качестве апробации теоретических исследований проведен эксперимент на примере г. Салехарда.

Результаты. Разработанная методика позволяет определить КОК арктического города и выработать предложения по улучшению. Создание КОК арктического города поможет развить сеть общественных пространств и обеспечить связь между ними, что крайне важно в сложных климатических условиях Севера. Проектный эксперимент на примере г. Салехарда подтвердил применимость методики.

Выводы. Существующее состояние культурных, исторических и природных объектов арктических городов требует внимания специалистов-градостроителей. Также очевидно, что связность объектов притяжения в условиях сложного климата арктических городов — необходимое условие безопасности. Методика построения КОК в городах Арктики позволит сформировать связную сеть общественных пространств города, повысит комфортность и безопасность среды жизнедеятельности для жителей, а также поможет развитию туристических маршрутов в городе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Арктика, общественные пространства, туристический потенциал Арктики, культурно-общественный каркас, географическая информационная система (ГИС), комфортная среда в Арктике, устойчивое развитие

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Данилина Н.В., Коробейникова А.Е., Хазбулатова А.Р. Методика построения культурно-общественного каркаса арктических городов на примере г. Салехарда // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 10. С.1515–1531. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1515-1531

Автор, ответственный за переписку: Анна Евгеньевна Коробейникова, anna-chega@mail.ru.

Methodology of building cultural and public framework of arctic cities on the example of Salekhard city

Nina V. Danilina, Anna E. Korobeinikova, Alina R. Khazbulatova
*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Currently, much attention is paid to the development of the Arctic zone of the Russian Federation. The increased interest in the Russian Arctic is associated not only with the discovery of the Northern Sea Route, but also with the great economic, social, raw materials and tourism potential of the territory. The development of the Arctic city is impossible without taking into account its public spaces, their condition and their connectivity. It is the inseparability of cultural, historical and natural objects of the city that makes it possible to create a sustainable, capable of development cultural and social framework.

Materials and methods. The analysis of cultural, historical and natural objects of the Arctic cities was carried out, modern GIS technologies for modelling of the cultural and social framework were used, as approbation of theoretical research, an experiment was conducted on the example of the Salekhard city.

Results. The developed methodology makes it possible to determine the cultural and social framework (CSF) of the Arctic city and develop a proposal for improvement. The creation of the cultural and social framework of the Arctic city will help

to develop a network of public spaces and provide a link between them, which is extremely important in the complex climatic conditions of the North. The design experiment on the example of the city of Salekhard confirmed the applicability of the methodology.

Conclusions. The study showed that the current state of cultural, historical and natural objects of the Arctic cities requires the attention of city planners. It is also obvious that the connectivity of attraction objects in the complex climate of the Arctic cities is a necessary condition for security. The methodology of building a cultural and public framework in the Arctic cities will allow to form a coherent network of public spaces in the city, increase the comfort and safety of the living environment for residents, as well as help to develop tourist routes in the city.

KEYWORDS: Arctic, public spaces, tourism potential of the Arctic, cultural and social framework, GIS, comfortable environment in the Arctic, sustainable development

FOR CITATION: Danilina N.V., Korobeinikova A.E., Khazbulatova A.R. Methodology of building cultural and public framework of arctic cities on the example of Salekhard city. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(10):1515-1531. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1515-1531 (rus.).

Corresponding author: Anna E. Korobeinikova, anna-chega@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы связана с разработкой документов пространственного развития Арктической зоны. Исследования данной работы были проведены, опираясь на Стратегию развития Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года, где обозначен ряд задач и ожидаемых результатов, связанных с развитием Арктической зоны России¹. В связи с этим разработок на эту тему становится больше, а механизмы управления данными территориями создаются ускоренными темпами² [1].

Градостроительное освоение арктических территорий выдвигает особые требования к формированию комфортной городской среды. В первую очередь, это суровый климат, характеризующийся низкими температурами, высокими скоростями ветра и большим количеством осадков [2–4]. Полярная ночь в совокупности с вышеперечисленными факторами становятся причиной дискомфорта длительного нахождения на открытых пространствах и, как следствие, снижения разнообразности досуга жителей арктических городов [5, 6]. Также стоит отметить, что низкие арктические температуры и высокие скорости ветровых потоков могут стать причиной значительного сокращения времени обморожения, что указывает на то, что обеспечение связности объектов притяжения в арктических городах — это критерий не только комфортности среды жизнедеятельности, но и безопасности [7–9]. Исходя из вышесказанного, создание культурно-общественного каркаса (КОК) в городах Арктики также является вопросом безопасности. В условиях низких температур, высоких скоростей ветров и сложного рельефа перемещение между объектами

притяжения становится сложной и небезопасной для здоровья человека задачей [4, 10–12]. Вопросом климатической комфортности человека занимались многие ученые, к примеру Е.М. Ратнер, Ф.Л. Серебровский и др. [13, 14]. Среди зарубежных исследователей в области влияния климата на человека можно выделить В. Blocken, R.J. Oszczewski и др.

Говоря о градостроительном освоении Арктики, стоит уделить особое внимание рациональному использованию имеющихся ресурсов, а также обеспечению их доступности. Обращаясь к целям устойчивого развития (ЦУР), можно отметить, что ЦУР № 11 «Устойчивые города и населенные пункты» звучит следующим образом: «К 2030 году обеспечить всеобщий доступ к безопасным, доступным и открытым для всех зеленым зонам и общественным местам, особенно для женщин и детей, пожилых людей и инвалидов». Реализовать это возможно путем объединения всех объектов социально-культурной жизни города в единую систему, которую мы называем культурно-общественный каркас. Создание КОК на территориях арктических городов позволит развить систему комфортных и безопасных общественных пространств не только для жителей города, но и для туристов. Города АЗРФ, помимо прочих важных аспектов, обладают большим туристическим потенциалом, что связано с географическим расположением и богатой историей их развития. Однако ввиду ряда факторов (в том числе климатических особенностей) даже в самых крупных городах Арктики нет четко сформированного КОК, прослеживается низкий уровень связанности территорий. Таким образом, можно утверждать, что создание связного КОК в арктических городах — приоритетная задача для градостроителей. Культурно-общественный каркас необходим не только для формирования комфортной среды жизнедеятельности местного населения города, но и для развития туристического потенциала городов Арктики. Формирование КОК, обеспечивающего связность городской среды, в арктических городах позволит повысить их устойчивость и будет способствовать дальнейшему устойчивому развитию. Отдельно стоит отметить, что развитие культурно-общественных пространств в городах Арктики обладает рядом

¹ Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. URL: <https://docs.cntd.ru/document/499002465>

² О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года : Указ Президента РФ от 26.10.2020 № 645. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45972>

особенностей [12]. В настоящее время существует понятие «объекты культурного наследия», которое подразумевает все материальные, интеллектуальные и художественные ценности с точки зрения истории, археологии, культуры, архитектуры, науки и искусства. Объекты культурного наследия в арктических поселениях представлены уникальными достопримечательностями, такими как, например, петроглифы или стоянки коренных народов Севера [15, 16]. Построение и оценка КОК арктического города позволит выявить территории с большим туристическим потенциалом, а также определить территории, требующие развития [17, 18]. Выявление КОК также поможет в достижении устойчивого развития городов Арктики, что соответствует цели устойчивого развития 11.7.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методология исследования

Культурно-общественный каркас города — это совокупность объектов, представляющих социально-общественное значение как для населения города, так и для развития бизнеса, в том числе привлечения внешнего потока туристов.

В данном исследовании авторы выделили три группы:

- природные объекты — от скверов и бульваров (самых компактных зеленых зон в городах) до особо охраняемых природных территорий;
- исторические объекты — здания, комплексы зданий, исторические центры городов, обладающие признаками исторической ценности;
- объекты культуры — театры, кинотеатры, клубы, музеи, развлекательные центры, спортивные объекты и многие другие объекты развлекательно-познавательного характера, являющиеся фокусами притяжения населения вне трудовой деятельности.

Особое внимание уделено специфическим особенностям Арктического региона. Помимо сложного климата, объекты притяжения арктических городов обладают большим количеством других особенностей — уникальная природа АЗРФ, арктическая айдентика, культурный код малых народов и т.д., которые также учтены в исследовании (рис. 1) [19, 20].

К природным объектам относятся традиционные парки, скверы, бульвары, городские леса и площади. Также к природным объектам в Арктической зоне можно отнести пляжи, которые, несмотря на не вполне пригодный для пляжного отдыха климат, обладают



Рис. 1. Состав культурно-общественного каркаса с учетом специфики городов АЗРФ

Fig. 1. Composition of the cultural and social framework, taking into account the specifics of the cities of the Arctic zone

уникальным природным ландшафтом и становятся активным фокусом притяжения посетителей.

Исторические объекты представлены в основном краеведческими музеями, отражающими уникальность быта и культуры коренных народов, а также мемориальными памятниками. Многие города Арктики обладают достаточно большим количеством памятников архитектуры и градостроительства со времен ее освоения и строительства городов [16].

В объекты культуры входят объекты культурно-бытового обслуживания — театры, кинотеатры, стадионы и т.д., а также уникальные объекты, характерные только для Арктической зоны, — петроглифы, стоянки коренных народов и т.д. Отдельно стоит отметить, что для Арктики особенностью является очень короткий летний сезон, который не позволяет развивать открытые общественные пространства, поэтому все общественные функции должны быть сосредоточены в закрытых помещениях.

Цель создания КОК арктического поселения — концентрация объектов культурно-общественного значения в городах в рамках связанной системы территорий (рис. 2).

В структуре культурно-общественного каркаса территории размещения объектов КОК выступают как фокусы притяжения посетителей (населения и туристов). Роль линейных объектов, обеспечивающих формирование связанного каркаса, выполняют транспортные артерии — тропы, временные зимние дороги, городские улицы и дороги, а также железнодорожные ветки. Таким образом, обеспечивается ряд важных характеристик, необходимых для устойчивого развития городов, таких как связность, доступность и привлекательность среды жизнедеятельности. Культурно-общественный каркас должен обладать тремя важнейшими параметрами:

- пространственной связностью городской среды;
- доступностью городской среды (пешеходная, транспортная);
- привлекательностью.

Учет данных параметров позволит создать связный КОК арктического города, который будет напрямую влиять на повышение безопасности и устойчивости городской среды (рис. 3).

Пространственная связность культурно-общественного каркаса арктического города

Пространственная связность — один из важнейших параметров безопасной и комфортной городской среды. Также пространственная связность является показателем устойчивости, определить которую можно через параметры и связность городских сетей. Под пространственной связностью предлагается понимать обеспечение транспортной и пешеходной связи между объектами КОК с учетом особенностей арктических поселений (рис. 4).

Для арктических городов пространственная связность городской среды — важнейший критерий безопасности, так как низкие температуры, высокие скорости ветра, полярная ночь и сложный ландшафт делают невозможным безопасное использование городской среды без соблюдения связности. Учитывая специфику арктических поселений и их уникальных объектов притяжения, например петроглифы или стоянки коренных народов Севера, можно утверждать, что многие объекты КОК поселений АЗРФ находятся на значительном расстоянии друг от друга. Исходя из этих особенностей, необходимо оценить связность КОК не только пешеходную, но и транспортную. Однако на данный момент нет четкой методики оценки пространственной связности КОК города. Проанализировав существующий отечественный и зарубежный опыт, можно утверждать, что важнейшими параметрами для оценки связности городской среды являются:

- размер территории;
- плотность размещения объектов КОК;
- многообразие объектов КОК.

Связность городской среды в арктических городах позволит сформировать безопасную и комфортную систему общественных пространств, а также

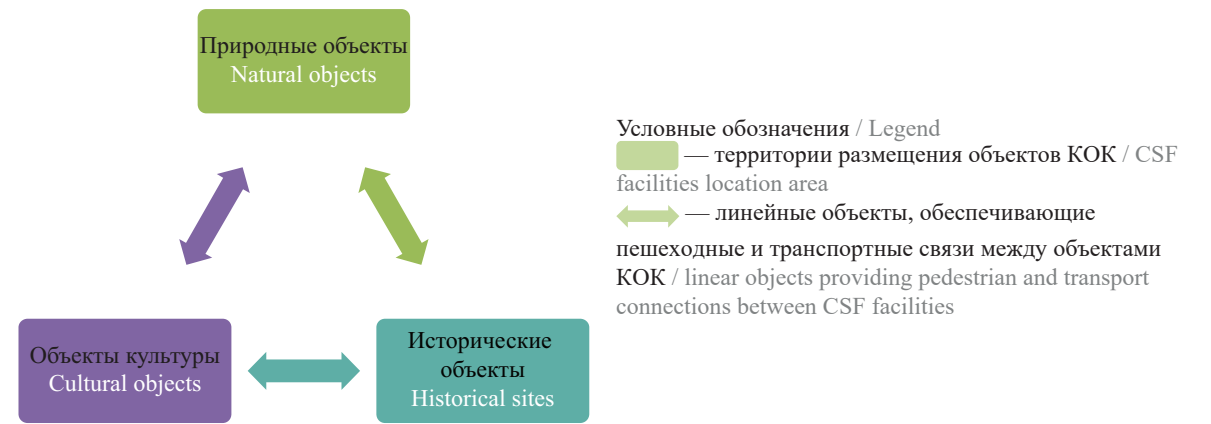


Рис. 2. Структура культурно-общественного каркаса городов АЗРФ

Fig. 2. The structure of the cultural and social framework of the cities of the Arctic zone

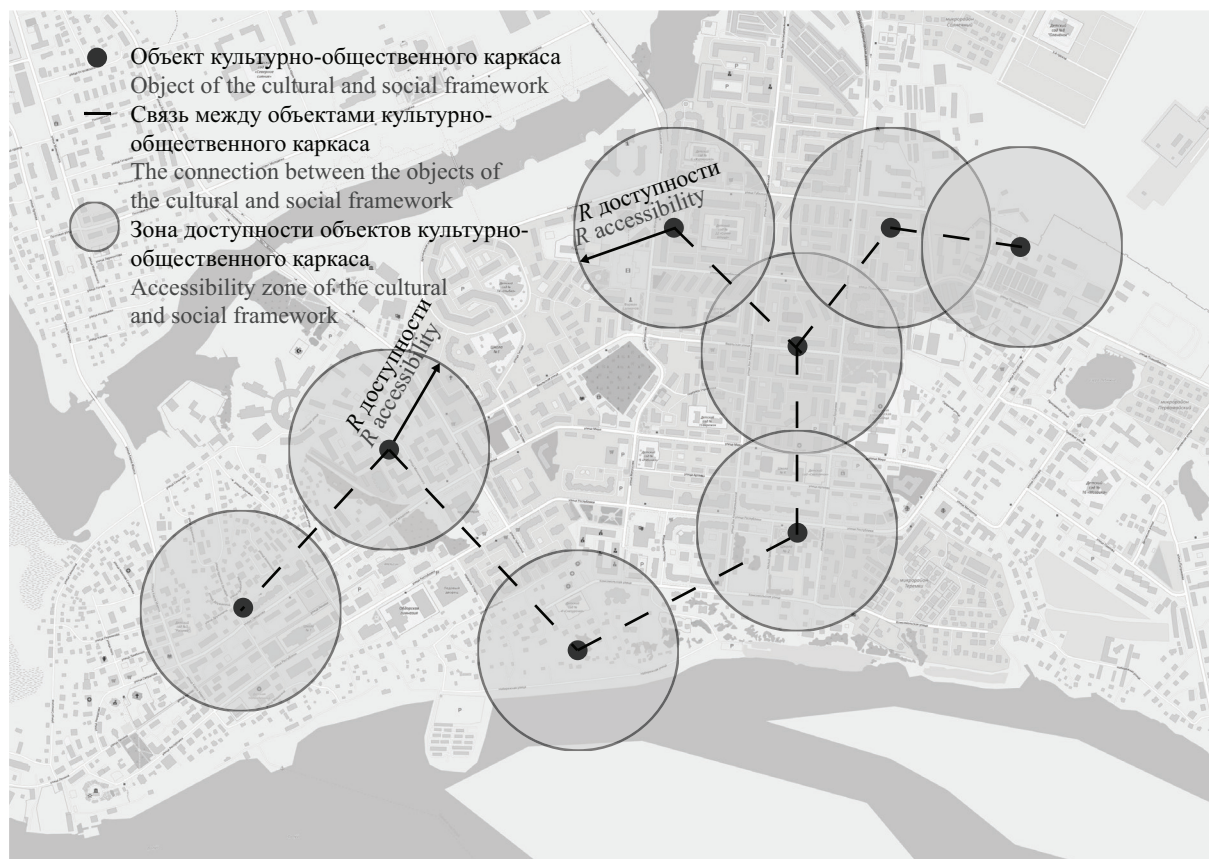


Рис. 3. Схема культурно-общественного каркаса города

Fig. 3. Scheme of the cultural and social framework of the city

туристический каркас городов и развить их богатый туристический потенциал.

Доступность объектов КОК арктического города

Доступ к объектам культурно-общественно-го каркаса, бытовым услугам и рекреационным зонам — один из важнейших принципов формирования комфортной городской среды. Под *доступностью объектов КОК* арктического города предлагается понимать пешеходную/транспортную доступность с учетом особенностей арктических поселений. В городах Арктики задача обеспечения доступности объектов КОК осложняется особенностями градостроительного проектирования в сложных климатических и геоморфологических условиях (рис. 5). Радиусы доступности для объектов притяжения, рассчитанные на города с комфортными климатическими условиями, не могут быть использованы в арктических поселениях без потери комфортности и безопасности среды проживания. Исходя из вышесказанного, очевидно, что необходимо определить транспортную и пешеходную доступность объектов КОК для арктических городов. С учетом определенных выше особенностей АЗРФ, низких температур, сильных ветров, ландшафта, полярной ночи, состояние транспортной инфраструктуры — это факторы, существенно влияющие

на доступность объектов притяжения арктических городов.

Определять транспортную и пешеходную доступность объектов КОК для арктических городов необходимо через построение изохрон доступности по времени с обязательным учетом возможного обморожения для пешеходов.

Привлекательность объектов КОК арктического города

Привлекательность городской среды играет значительную роль в формировании КОК арктического города. Привлекательные объекты КОК помогут привлечь посетителей как из числа местных жителей, так и гостей города. Привлекательным объектом КОК считается, если он обладает следующими функциями — высокий уровень благоустройства территории, высокий уровень пешеходной доступности, адаптация среды под маломобильную группу населения (МГН), разнообразие функций объекта, эстетическая привлекательность. Для оценки привлекательности необходимо разработать шкалу привлекательности объектов КОК при помощи визуального анализа. При оценке объектов КОК арктических городов надо принимать во внимание, что они обладают рядом особенностей. Например, привлекательность объекта притяжения должна учиты-

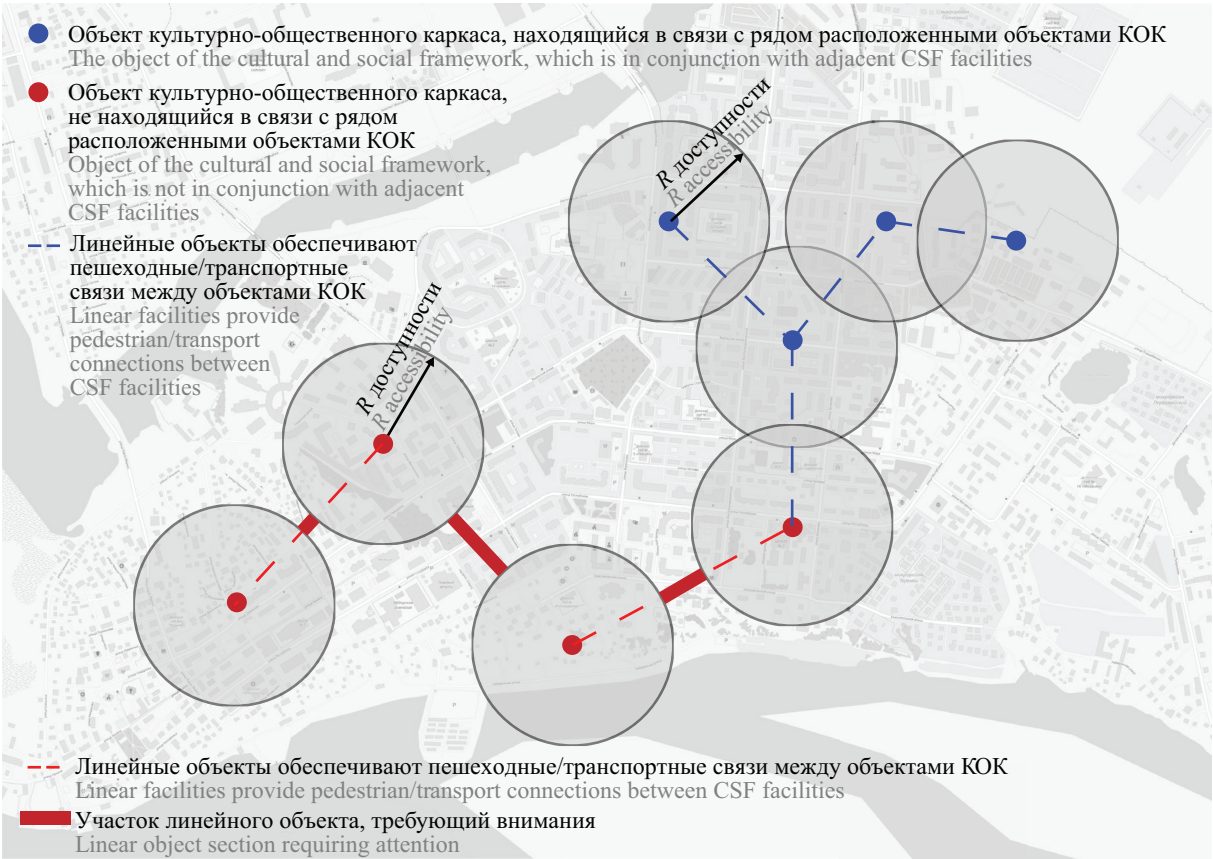


Рис. 4. Схема связности культурно-общественного каркаса
Fig. 4. Schematic of the connectivity of the cultural and social framework

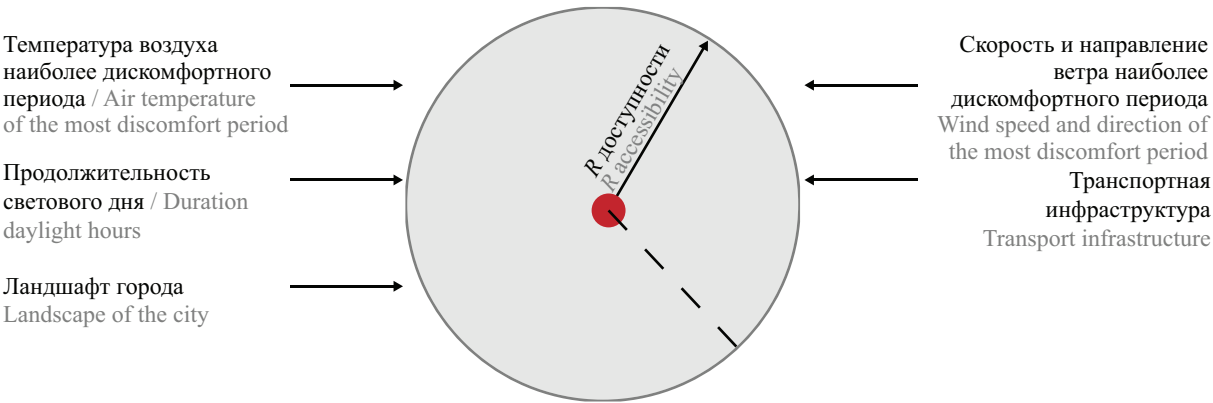


Рис. 5. Теоретическая модель доступности объектов КОК арктических поселений
Fig. 5. Theoretical model of accessibility of CSF facilities of the Arctic settlements

вать видимость и восприятие его во время полярной ночи или снежной пурги.

Материалы исследования

В качестве объекта исследования выбран г. Салехард, как один из крупных административных центров Арктической зоны России. Салехард располагается в Ямало-Ненецком округе РФ (рис. 6). Численность населения города составляет более 50 тыс. человек. Построение КОК на примере Салехарда также обосновано тем, что он включен в список исторических городов России. Салехард в настоящее время являет-

ся перспективным арктическим городом, к которому обращено внимание современных градостроителей, об этом свидетельствуют большое количество исследований, предложений по развитию города и разработки концепций развития сферы культуры города [21, 22]. В городе сосредоточено много памятников региональной архитектуры, история которых тесно связана с уникальным расположением и климатическими характеристиками. Сохранение их исторического облика и уникальности напрямую зависит от состояния объектов КОК и связанности между ними, которая и формирует культурно-общественный каркас города.

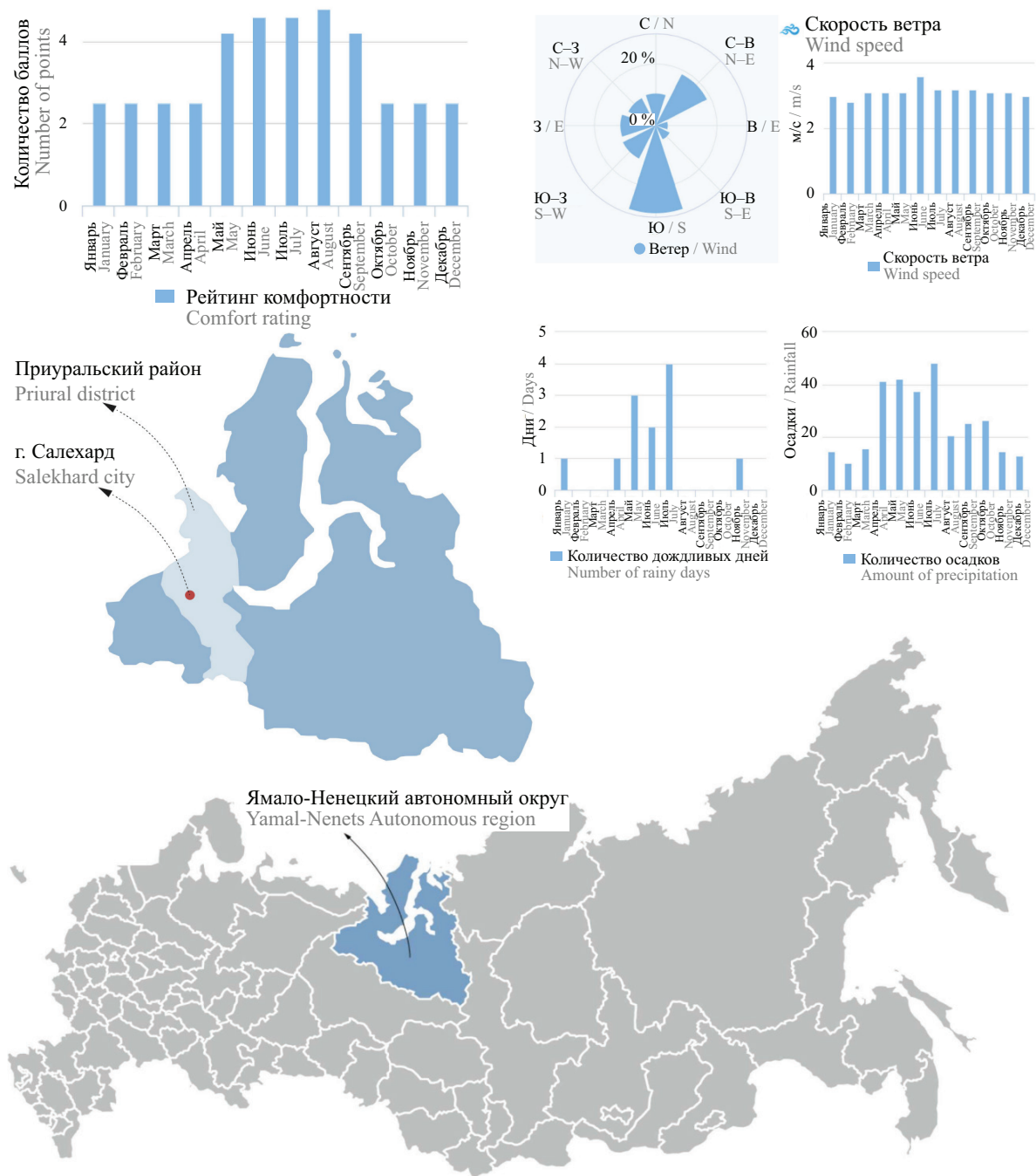


Рис. 6. Схема расположения г. Салехарда и его климатические параметры
Fig. 6. Salekhard city layout and climatic parameters

Порядок проведения исследования

Для эффективной работы каждого из исследуемых объектов необходимо рассматривать их комплексно в структуре КОК. Для целей градостроительного планирования и проектирования важна организация процессов генерации, сбора, обработки информации, на основании которых возможно принимать обоснованные решения при реализации программ развития городской среды. В качестве инструмента информационного моделирования в исследовании выбрана геоинформационная система, которая позволяет системно подойти к вопросу сбо-

ра и обработки информации. Исследование включало три основных этапа, представленных на рис. 7:

- 1. Сбор информации:
 - пространственный анализ размещения отдельных видов объектов;
 - визуальная оценка состояния объектов;
 - ввод данных в систему в виде атрибутов:
 - 1) название;
 - 2) тип объекта;
 - 3) расположение;
 - 4) оценка состояния.



Рис. 7. Алгоритм построения культурно-общественного каркаса города

Fig. 7. Algorithm of building the cultural and social framework of the city

Табл. 1. Пятибалльная система оценки состояния объектов КОК

Table 1. Five-point evaluation system for CSF objects

Оценочный балл Score	Оценка Evaluation	Характеристика Characteristics
1	Очень низкий Very low	Отсутствует разнообразие функций объекта, ветхое состояние объекта, низкий уровень пешеходной доступности, отсутствие дорожного покрытия Lack of diversity of facility functions, dilapidated condition of the facility, low level of pedestrian accessibility, lack of pavement
2	Низкий Low	Наблюдается минимальное разнообразие функций объекта, наличие дорожного покрытия, низкий уровень доступности для МГН, отсутствие разнообразия функций объекта There is a minimum diversity of facility functions, the presence of pavement, low level of accessibility for PLM, lack of diversity of facility functions
3	Средний Medium	Среднее разнообразие функций объекта, наличие МАФов, дорожного покрытия, растительности, высокий уровень доступности территории The average diversity of functions of the object, the presence of MAF, pavement, vegetation, a high level of accessibility of the territory
4	Высокий High	Функциональное разнообразие объекта, проведена реконструкция зданий и сооружений, благоустройство на высоком уровне Functional diversity of the object, reconstruction of buildings and structures, landscaping at a high level
5	Очень высокий Very high	Высокое разнообразие функций объекта, высокий уровень благоустройства территории размещения объекта, высокий уровень пешеходной доступности, адаптация среды под МГН High diversity of functions of the object, a high level of improvement of the territory where the object is located, a high level of pedestrian accessibility, adaptation of the environment for groups of people with PLM

2. Оценка существующего КОК:
 - введение существующих линейных связей в виде атрибутов:
 - 1) пешеходные;
 - 2) транспортные;
3. Проектирование КОК:
 - построение временных изохрон транспортных/пешеходных.
 - создание линейных связей между существующими объектами;

• предложения по строительству новых объектов КОК в рамках системы.

Первый этап представляет сбор информации об объектах КОК и проведение их оценки методом визуального анализа. Для исследования предложена пятибалльная система оценки состояния объектов КОК, представленная в табл. 1.

Данные об объектах, их координатах и состоянии вводятся в виде атрибутов в ГИС для дальнейшего построения КОК [23]. Предлагается вводить следующие типы атрибутов:

- 1) название;
- 2) тип объекта;
- 3) расположение;
- 4) оценка состояния объекта при помощи шкалы оценки объектов КОК.

На втором этапе проводится оценка существующего состояния культурно-общественного каркаса — вводятся линейные объекты для оценки транспортной и пешеходной связи между объектами, а также строятся временные изохроны для объектов КОК.

На третьем этапе осуществляется построение линейных связей между объектами КОК методом соединения всех объектов по пешеходным/транспортным путям города. Также на данном этапе разрабатываются предложения по строительству новых объектов КОК и реконструкции существующих.

Разработанный алгоритм позволит построить и проанализировать КОК города, разработать рекомендации и стратегии дальнейшего развития на его основе. Также построенный в ГИС каркас может быть использован для моделирования различных сценариев развития.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первый этап методики построения КОК Салехарда заключается в сборе информации об объектах культурно-общественного каркаса и их оценке методом визуального анализа. Выявленные объекты притяжения были разделены на три группы — культурные, природные и исторические; при помощи визуального анализа оценено состояние каждого объекта. Все полученные данные занесены в таблицы (табл. 2–4). Для исследования применили про-

Табл. 2. Оценка состояния природных объектов

Table 2. Assessment of the state of natural objects

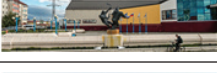
Наименование объекта Name of the object	Фотофиксация Photo fixation	Оценка состояния Condition Assessment				
		1	2	3	4	5
Сквер Автомобилистов Automobile Workers Square						
Парк Победы Victory Park						
Молодежный сквер Youth Square						
Городской парк City Park						

Табл. 3. Оценка состояния исторических объектов

Table 3. Evaluation of the condition of historical objects

Наименование объекта Name of the object	Фотофиксация Photo fixation	Оценка состояния Condition Assessment				
		1	2	3	4	5
Ямало-Ненецкий окружной музейно-выставочный комплекс им. И.С. Шемановского Yamalo-Nenets District Museum and Exhibition Complex named after I.S. Shemanovsky						
Историко-архитектурный комплекс «Обдорский острог» Obdorsky Ostrog Historical and Architectural Complex						«

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Наименование объекта Name of the object	Фотофиксация Photo fixation	Оценка состояния Condition Assessment				
		1	2	3	4	5
Комплекс городской усадьбы City Manor Complex						
Мемориал строителям 501-й стройки Memorial to the builders of the 501st construction site						
Торговый дом купца Корнилова Merchant Kornilov's Trading House						
Музей полярной авиации Polar Aviation Museum						
Музей-квартира Л.В. Лапсуя Museum-apartment of L.V. Lapsui						
Окружной Дом ремесел County House of Crafts						
Окружной центр национальных культур District Center of National Cultures						
Памятник геологу Ф.К. Салманову Monument to the Geologist F.K. Salmanov						
Памятник «Коренным малочисленным народам Севера» Monument to the Indigenous Peoples of the North						
Памятник «Мамонту» Mammoth Monument						
Скульптура «Северный олень» Reindeer sculpture						
Скульптура «Хоккеисты» Sculpture Hockey Players						
Стела «66 параллель» The 66th Parallel stele						
Стела «Романтика 70-х» Stela Romance of the 70s						
Военные автомобили Military vehicles						

граммное обеспечение QGIS версии 3.24.0 Tisler. Также для построения КОК в ГИС загружены данные об улично-дорожной сети (УДС) из открытых источников Open Street Map. Все перечисленные выше объекты были добавлены на карту в виде векторных точек с атрибутами и координатами.

Табл. 2 позволяет сделать вывод о том, что большинство природных объектов Салехарда недостаточно благоустроено, требуется реконструкция

памятников, уровень пешеходной доступности оценивается как средний.

Исходя из данных табл. 3, можно сделать вывод, что большинство исторических объектов нуждается в реконструкции, в частности, памятники, находящиеся на периферии города, уровень пешеходной доступности оценивается как средний, а для ряда объектов — ниже среднего.

Исходя из табл. 4, можно сделать вывод, что большинство объектов культуры находятся в со-

Табл. 4. Оценка состояния объектов культуры

Table 4. Assessment of the state of cultural objects

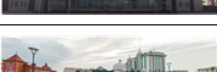
Наименование объекта Name of the object	Фотофиксация Photo fixation	Оценка состояния Condition Assessment				
		1	2	3	4	5
Культурно-деловой центр Cultural and business center						
Мечеть Нурд-Камал Nurd-Kamal Mosque						
Церковь иконы Божией Матери «Всех скорбящих Радость» Church of the Icon of the Mother of God of Joy of All Who Sorrow						
Петропавловская церковь Peter and Paul Church						
Ледовый дворец The ice palace						
Здание театра 501-й стройки The building of the theater of the 501st construction site						
Национальный ансамбль танца «Сыра-Сэв» National Dance Ensemble Syra-Sev						
КДЦ «Наследие» Heritage Cultural Center						
Кинотеатр Премьер Зал Premier Hall Cinema						
Кинотеатр 3D 3D Cinema						
Кинотеатр Премьер Premier Cinema						
Национальная библиотека ЯНАО National Library of YANAO						
Библиотека детского и семейного чтения Children's and Family Reading Library						
Государственный Архив Ямало-Ненецкого автономного Округа State Archive of Yamalo-Nenets Autonomous Region						
Централизованная библиотечная Система Centralized Library System						
Спортцентр им. Ю. Захаревича Zakharevich Sports Center						
СК «Авиатор» SC Aviator						



Рис. 8. Транспортная и пешеходная инфраструктура г. Салехарда

Fig. 8. Transport and pedestrian infrastructure of Salekhard

стоянии ниже среднего, требуется реконструкция зданий, в частности зданий кинотеатров, библиотек и спортивных объектов.

По проведенному анализу объектов КОК г. Салехарда можно сделать вывод, что в настоящее время большинство объектов притяжения находятся в состоянии ниже среднего и среднем (2 и 3). Необходимо уделить особое внимание памятникам архитектуры, немногочисленным паркам, провести реконструкцию мест притяжения людей для создания наиболее привлекательной и комфортной среды не только для приезжих, но и для жителей города.

Также в Салехарде не хватает мест для проведения досуга и массовых мероприятий. Кроме того, в городе прослеживается низкий уровень связанности объектов КОК и комфортности передвижения между ними.

На втором этапе проводится оценка существующего состояния КОК Салехарда. Данные о линейных объектах, их координатах вводятся в ГИС для дальнейшего построения культурно-общественного каркаса г. Салехарда. Также на данном этапе проводится анализ транспортной и пешеходной инфраструктуры города (рис. 8).

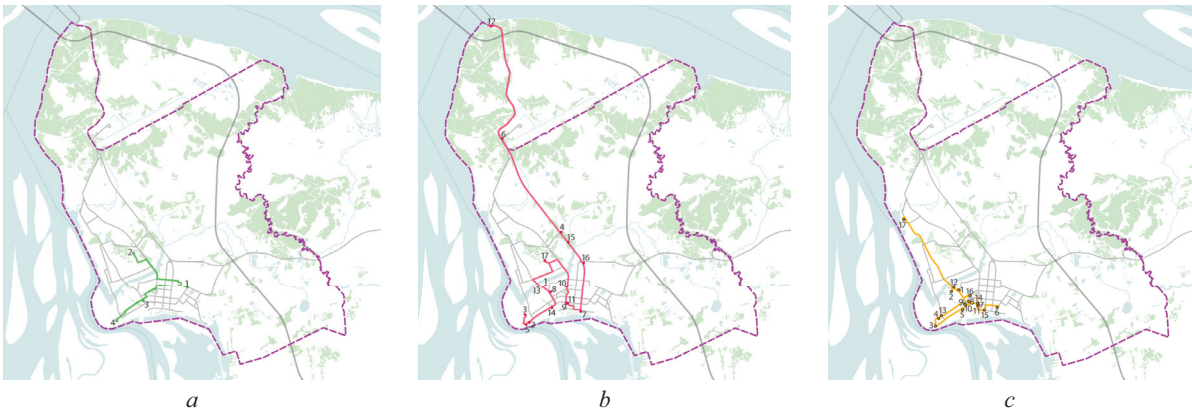


Рис. 9. Элементы культурно-общественного каркаса по типам: а — природные объекты КОК; b — исторические; c — объекты культуры культурно-общественного каркаса

Fig. 9. Elements of the CSF by type: a — Natural objects of the cultural and social framework; b — Historic objects of the cultural and social framework; c — Cultural facilities of the cultural and social framework

При помощи расширений для QGIS Networks и QNEAT3 — Qgis Network Analysis Toolbox между объектами были созданы пространственные связи по кратчайшим пешеходным путям. Посредством соединения объектов КОК пешеходными связями получаем отдельно связанные между собой объекты (по трем ранее выделенным группам) — природные, исторические и объекты культуры (рис. 9).

При помощи операции наложения в QGIS все объекты с пространственными связями соединены в единый культурно-общественный каркас г. Салехарда (рис. 10).

Для оценки доступности были построены временные изохроны транспортной и пешеходной доступности для объектов КОК г. Салехарда (рис. 11). В условиях арктических городов временные изохроны имеют большое значение при оценке связности КОК, так как длительное перемещение по городу пешеходов может привести к обморожению. Таким образом, доступность и связность КОК для арктических городов необходимо оценивать через среднюю температуру и скорость ветра дискомфорта периода с учетом скорости обморожения кожных покровов. Такой подход позволит обеспечить безопасность передвижения не только местных жителей, но и туристов.

После анализа временных изохрон КОК г. Салехарда было выявлено, что большинство объектов сосредоточено в историческом центре города, однако отдельные объекты располагаются значительно

дальше от остальных и не имеют хорошей связи с ними. Также прослеживается значительная длина пешеходных маршрутов между объектами КОК. В сложных климатических условиях Арктики это создает угрозу комфорту и безопасности как жителей города, так и туристов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исходя из проведенного исследования, можно утверждать, что разработанная методика построения КОК позволяет выявить и построить культурно-общественный каркас городов Арктики с целью выявления комфортности и безопасности КОК, а также определения туристического потенциала территории. Построение КОК арктических городов дает возможность проанализировать и составить общие рекомендации для развития общественных пространств городов Арктики, а также раскрыть богатый туристический потенциал арктических территорий.

В результате исследования Салехарда выявлены низкая связность объектов КОК, среднее и ниже среднего состояние объектов всех групп КОК. Очевидно, что необходимо свести к минимуму низкую связность между объектами КОК городов Арктики ввиду климатических особенностей региона. В качестве рекомендаций можно рассмотреть варианты улучшения сети общественного транспорта по путям КОК, создание теплых остановок и отопливаемых

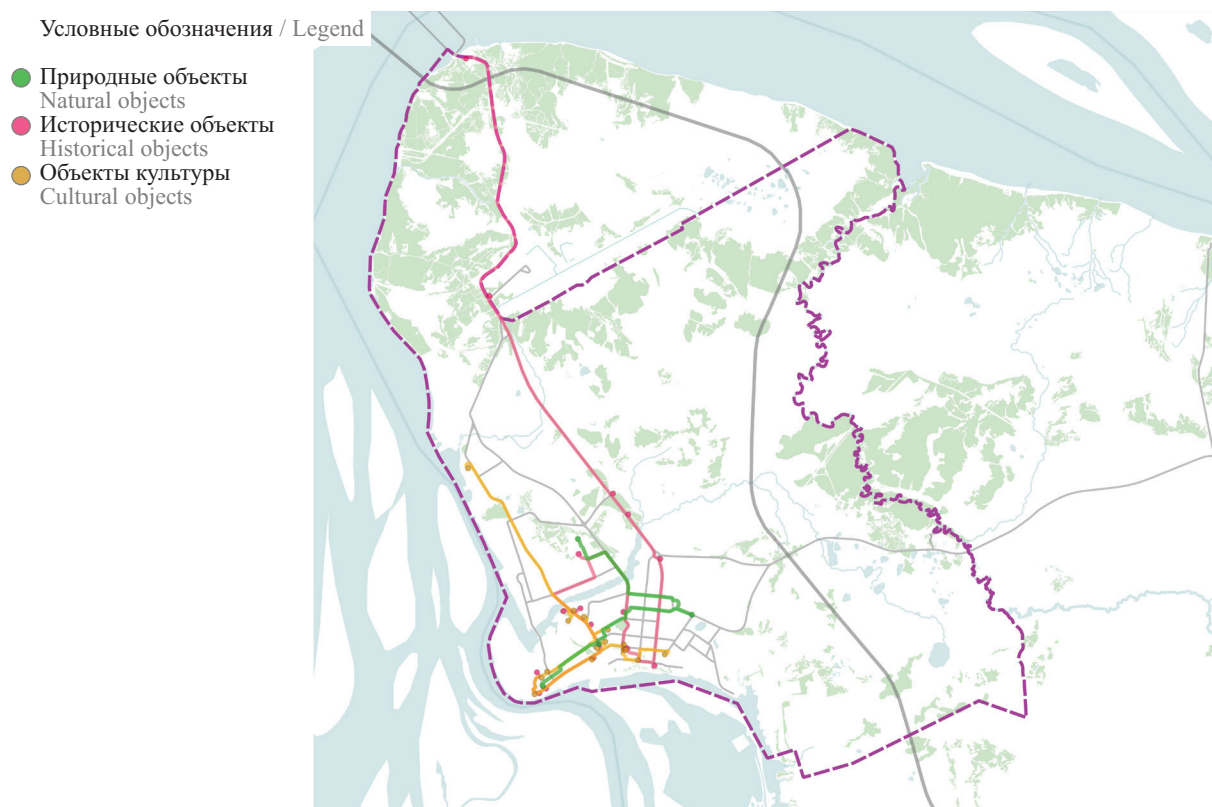


Рис. 10. Культурно-общественный каркас Салехарда

Fig. 10. CSF of the Salekhard city

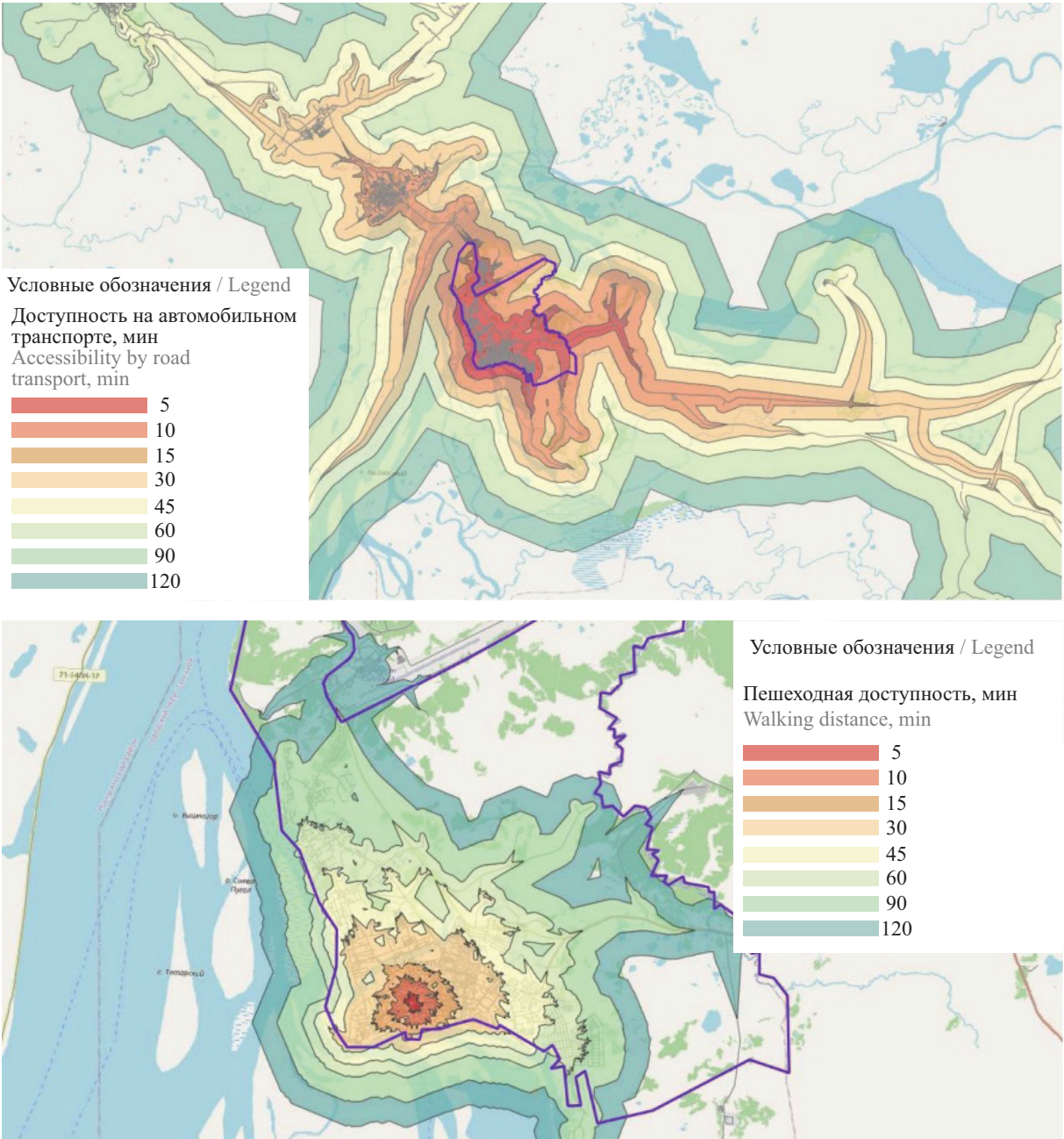


Рис. 11. Изохроны транспортной и пешеходной доступности г. Салехарда

Fig. 11. Transport and pedestrian accessibility isochrones of Salekhard

мых МАФ, а также разработку новых нормативов, рекомендаций и критериев доступности объектов притяжения в поселениях АЗРФ. Все перечисленные методы повышения качества и безопасности КОК городов Арктики требуют дополнительных

исследований. В первую очередь необходимо создать методику оценки связности культурно-общественного каркаса, которая позволит разработать рекомендации по проектированию связных КОК арктических городов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коробейникова А.Е. Тренд развития и формирования жилой среды поселений на склоновом рельефе в условиях Арктической зоны РФ // Вестник евразийской науки. 2019. Т. 11. № 4.

2. Semenova A., Konstantinov P., Varentsov M., Samsonov T.E. Modeling the dynamics of comfort thermal conditions in Arctic cities under regional climate change // IOP Conference Series: Earth and Environ-

mental Science. 2019. Vol. 386. Issue 1. P. 012017. DOI: 10.1088/1755-1315/386/1/012017

3. Kokotis P., Katsavos S. Effects of wind chill factor, temperature and other meteorological parameters on the incidence of Bell's palsy: results based on a retrospective, 7-year long, Greek population study // *Neuroepidemiology*. 2015. Vol. 45. Issue 1. Pp. 44–49. DOI: 10.1159/000433542

4. Янковская Ю.С., Лебедева Е.Н., Лобанов Ю.Н. Природно-климатические и экологические аспекты в архитектурно-градостроительном проектировании и исследовании жилой среды // *Вестник гражданских инженеров*. 2020. № 5 (82). С. 49–58. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-49-58. EDN UAVNDR.

5. Prokopova S. The concept of a “Warm” city in the arctic: basic ideas of comfort in the urban environment (the case of Western Siberia, Russia) // *Technical Aesthetics and Design Research*. 2022. Vol. 3. Issue 4. Pp. 22–28. DOI: 10.34031/2687-0878-2021-3-4-22-28

6. Барсукова Н.И. Создание общественных пространств для арктических городов России // *Цивилизационные аспекты развития Арктических регионов России : материалы III научно-практической конференции*. 2022. С. 8–17. EDN JGGVAL.

7. Коробейникова А.Е. Особенности формирования аэрационного режима жилой застройки на склоновых территориях // *Экология урбанизированных территорий*. 2021. № 4. С. 47–52. DOI: 10.24412/1816-1863-2021-4-47-52. EDN ZZQQLX.

8. Blocken B., Stathopoulos T., van Beeck J.P.A.J. Pedestrian-level wind conditions around buildings : review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment // *Building and Environment*. 2016. Vol. 100. Pp. 50–81. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.02.004

9. Korobeynikova A., Danilina N., Makisha N. Sustainable development of the slope lands of the Russian arctic: Investigation of the relationship between slope aspects, wind regime and residential wind comfort // *Land*. 2021. Vol. 10. Issue 4. P. 354. DOI: 10.3390/land10040354

10. Коробейникова А.Е. Критерии оценки аэрационного режима и качества проектных решений жилой застройки на склоновых территориях поселений Арктической зоны Российской Федерации // *Устойчивое развитие территорий : сб. докл. II-й Междунар. науч.-практ. конф.* 2019. С. 33–39. EDN CHZGQD.

11. Loginov V., Ignatyeva M., Balashenko V. Consistent approach to assess the comfort of living in the northern and arctic areas // *Economy of Region*. 2018. Vol. 14. Issue 4. Pp. 1399–1410. DOI: 10.17059/2018-4-26

12. Danilina N., Korobeynikova A. Features of assessment and formation of the aeration regime of residential development on the sloping lands of the Russian arctic // *Buildings*. 2022. Vol. 12. Issue 10. P. 1627. DOI: 10.3390/buildings12101627

13. Ратнер Е.М. Метод физиологической оценки местного климата по его воздействию на тепловое состояние человека // *Вопросы культурологии*. 1967. № 5. С. 446–451.

14. Серебровский Ф.Л. Взаимодействие ветра и жилой застройки : автореферат дис. ... канд. арх. М., 1964. 22 с.

15. Oszczewski R.J. The basis of wind chill // *Arctic*. 1995. Vol. 48. Issue 4. DOI: 10.14430/arctic1262

16. Романенко Ф.А. Историко-культурное наследие Арктики: опыт инвентаризации // *Полярные чтения на ледоколе «Красин»*. 2016. Т. 3. С. 212–226.

17. Huber M., Iakovleva O., Zhigunova G., Menshakova M.Y. Special Interest Tourism (SIT) in Murmansk (Arctic NE Scandinavia): Touristic route around the city to explore the oldest rocks in Europe // *Heritage*. 2023. Vol. 6. Issue 3. Pp. 2664–2687. DOI: 10.3390/heritage6030141

18. Miłosz H., Galina Z., Mariya M., Ramziya G., Olga I. Geoheritage of the Kandalaksha region (Kola Peninsula, White Sea, Arctic Russia), evaluation, and geotourism opportunities // *Geoheritage*. 2022. Vol. 14. Issue 4. DOI: 10.1007/s12371-022-00726-4

19. Drozdova I.V., Alievskaya N.V., Belova N.E. Problems and prospects for the development of the arctic zone of the Russian Federation // *Proceedings of ARCTD 2021*. 2022. Pp. 137–143. DOI: 10.1007/978-3-030-99626-0_15

20. Kuklina V., Sizov O., Fedorov R. Green spaces as an indicator of urban sustainability in the Arctic cities: Case of Nadym // *Polar Science*. 2021. Vol. 29. P. 100672. DOI: 10.1016/j.polar.2021.100672

21. Кибенко В.А. Верификация стратегии развития сферы культуры города Салехарда // *Урбанистика*. 2022. № 3. С. 61–73. DOI: 10.7256/2310-8673.2022.3.38734. EDN AWWVTR.

22. Важенина Т.М., Быненкова И.Н. Планирование социально-экономического развития северного города (на примере г. Салехарда) // *Проблемы устойчивого развития российских регионов : мат. Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием*. 2015. С. 283–290. EDN VNSTDTP.

23. Cetin M., Adiguzel F., Kaya O., Sahap A. Mapping of bioclimatic comfort for potential planning using GIS in Aydin // *Environment, Development and Sustainability*. 2018. Vol. 20. Issue 1. Pp. 361–375. DOI: 10.1007/s10668-016-9885-5

Поступила в редакцию 25 апреля 2023 г.

Принята в доработанном виде 11 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 5 июля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Нина Васильевна Данилина** — доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой градостроительства, член-корреспондент РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 686739, ResearcherID: AAE-7301-2020, Scopus: 57192377385, ORCID: 0000-0002-9465-6435; DanilinaNV@mgsu.ru;

Анна Евгеньевна Коробейникова — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 908166, ResearcherID: AAC-8979-2022, Scopus: 57209303653, ORCID: 0000-0002-4357-1757; anna-chega@mail.ru;

Алина Руслановна Хазбулатова — студентка; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; lina.khazbulatova@gmail.com.

Вклад авторов:

Данилина Н.В. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии исследования, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Коробейникова А.Е. — написание исходного текста, научное редактирование текста, развитие методологии исследования, создание схем и иллюстраций, итоговые выводы.

Хазбулатова А.Р. — сбор и обработка материала, написание исходного текста, создание иллюстраций и таблиц.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Korobeinikova A.E. The trend of development and formation of the living environment of settlements on the slope relief in the Arctic zone of the Russian Federation. *The Eurasian Scientific Journal*. 2019; 11(4). (rus.).
2. Semenova A., Konstantinov P., Varentsov M., Samsonov T.E. Modeling the dynamics of comfort thermal conditions in Arctic cities under regional climate change. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 386(1):012017. DOI: 10.1088/1755-1315/386/1/012017
3. Kokotis P., Katsavos S. Effects of wind chill factor, temperature and other meteorological parameters on the incidence of Bell's palsy: results based on a retrospective, 7-year long, Greek population study. *Neuroepidemiology*. 2015; 45(1):44-49. DOI: 10.1159/000433542
4. Yankovskaya Y.S., Lebedeva E.N., Lobanov Yu.N. Natural-climatic and environmental aspects in architectural and urban design and research of the residential environment. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 5(82):49-58. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-49-58. EDN UAVNDR. (rus.).
5. Prokopova S. The concept of a "Warm" city in the arctic: basic ideas of comfort in the urban environment (the case of Western Siberia, Russia). *Technical Aesthetics and Design Research*. 2022; 3(4):22-28. DOI: 10.34031/2687-0878-2021-3-4-22-28
6. Barsukova N.I. Creating public spaces for Russian arctic cities. *Civilization aspects of the development of the Arctic regions of Russia : proceedings of the III scientific-practical conference*. 2022; 8-17. EDN JGGVAL. (rus.).
7. Korobeinikova A.E. Specularities of aeration regime in residential areas on sloping territories. *Ecology of Urbanized Territories*. 2021; 4:47-52. DOI: 10.24412/1816-1863-2021-4-47-52. EDN ZZQQLX. (rus.).
8. Blocken B., Stathopoulos T., van Beeck J.P.A.J. Pedestrian-level wind conditions around buildings : review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment. *Building and Environment*. 2016; 100:50-81. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.02.004
9. Korobeynikova A., Danilina N., Makisha N. Sustainable development of the slope lands of the Russian arctic: Investigation of the relationship between slope aspects, wind regime and residential wind comfort. *Land*. 2021; 10(4):354. DOI: 10.3390/land10040354
10. Korobeinikova A.E. Criteria for assessing the aeration regime and the quality of design solutions of residential development in the slope areas of settlements in the Arctic zone of the Russian Federation. *Sustainable Development of Territories : collection of reports of the II International Scientific and Practical Conference*. 2019; 33-39. EDN CHZGQD. (rus.).
11. Loginov V., Ignatyeva M., Balashenko V. Consistent approach to assess the comfort of living in the northern and arctic areas. *Economy of Region*. 2018; 14(4):1399-1410. DOI: 10.17059/2018-4-26
12. Danilina N., Korobeynikova A. Features of assessment and formation of the aeration regime of residential development on the sloping lands of the Russian Arctic. *Buildings*. 2022; 12(10):1627. DOI: 10.3390/buildings12101627
13. Ratner E.M. Method of physiological estimation of local climate by its influence on a thermal condition of the person. *Problems of Culturology*. 1967; 5:446-451. (rus.).

14. Serebrovsky F.L. *Interaction of wind and residential development : abstract of thesis of the candidate of architecture*. Moscow, 1964; 22. (rus.).
15. Oszczewski R.J. The basis of wind chill. *Arctic*. 1995; 48(4). DOI: 10.14430/arctic1262
16. Romanenko F.A. Historical and cultural heritage of the Arctic: the experience of inventory. *Polar readings on the icebreaker "Krasin"*. 2016; 3:212-226. (rus.).
17. Huber M., Iakovleva O., Zhigunova G., Menshakova M.Y. Special Interest Tourism (SIT) in Murmansk (Arctic NE Scandinavia): Touristic Route around the City to Explore the Oldest Rocks in Europe. *Heritage*. 2023; 6(3):2664-2687. DOI: 10.3390/heritage6030141
18. Miłosz H., Galina Z., Mariya M., Ramziya G., Olga I. Geoheritage of the Kandalaksha region (Kola Peninsula, White Sea, Arctic Russia), evaluation, and geotourism opportunities. *Geoheritage*. 2022; 14(4). DOI: 10.1007/s12371-022-00726-4
19. Drozdova I.V., Alievskaya N.V., Belova N.E. Problems and prospects for the development of the Arctic Zone of the Russian Federation. *Proceedings of ARCTD 2021*. 2022; 137-143. DOI: 10.1007/978-3-030-99626-0_15
20. Kuklina V., Sizov O., Fedorov R. Green spaces as an indicator of urban sustainability in the Arctic cities: Case of Nadym. *Polar Science*. 2021; 29:100672. DOI: 10.1016/j.polar.2021.100672
21. Kibenko V.A. Verification of the strategy for the development of the sphere of culture of the city of Salekhard. *Urban Studies*. 2022; 3:61-73. DOI: 10.7256/2310-8673.2022.3.38734. EDN AWWVTR. (rus.).
22. Vazhenina T.M., Bynenkova I.N. Planning the socio-economic development of the northern city (on the example of Salekhard). *Problems of sustainable development of Russian regions : materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation*. 2015; 283-290. EDN VNSTDTP. (rus.).
23. Cetin M., Adiguzel F., Kaya O., Sahap A. Mapping of bioclimatic comfort for potential planning using GIS in Aydin. *Environment, Development and Sustainability*. 2018; 20(1):361-375. DOI: 10.1007/s10668-016-9885-5

Received April 25, 2023.

Adopted in revised form on May 11, 2023.

Approved for publication on July 5, 2023.

Bionotes: **Nina V. Danilina** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Urban Planning, Corresponding Member of RAASN; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 686739, ResearcherID: AAE-7301-2020, Scopus: 57192377385, ORCID: 0000-0002-9465-6435; DanilinaNV@mgsu.ru;

Anna E. Korobeinikova — Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 908166, ResearcherID: AAC-8979-2022, Scopus: 57209303653, ORCID: 0000-0002-4357-1757; anna-chega@mail.ru;

Alina R. Khazbulatova — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; lina.khazbulatova@gmail.com.

Contribution of the authors:

Nina V. Danilina — scientific supervision, research concept, development of research methodology, scientific editing of the text, final conclusions.

Anna E. Korobeinikova — text writing, scientific editing of the text, development of research methodology, creation of schemes and illustrations, final conclusions.

Alina R. Khazbulatova — material collection, material processing, initial text writing, creation of illustrations and tables.

The authors declare no conflict of interest.

Роль городских транспортных коридоров в формировании агломераций

Алексей Георгиевич Левашев

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ); г. Иркутск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Для успешного экономического и социального развития урбанизированных территорий требуется устойчивая транспортная система, обеспечивающая надежные связи между ними и доступность для ежедневных активностей населения. К наиболее значимым элементам транспортно-планировочного каркаса агломерации относятся линейные объекты, представленные транспортными коридорами (ТК), от которых зависит основная часть транспортных затрат на передвижения населения, а значит, транспортная доступность территорий. Высокий уровень транспортного обслуживания на таких важнейших элементах как ТК напрямую влияет на формирование устойчивых ежедневных миграций населения и потенциал развития прилегающих территорий, а следовательно, и на формирование границ агломерации.

Материалы и методы. Для территории Иркутской агломерации, которая включает г. Иркутск как основное ядро агломерации, города-спутники Ангарск и Шелехов и опоясывающую территорию Иркутского района, предложены подходы к формированию единой транспортной модели агломерации как основного инструмента для оценки транспортного спроса, анализа распределения транспортных потоков и показателей эффективности мероприятий по развитию территорий ТК и обслуживаемых ими территорий. Рассмотрены особые случаи составляющих моделей оценки транспортного спроса на передвижения между отдельными муниципалитетами. Предложен подход к оценке транспортного спроса на смежных сопряженных ТК, ранее использовавшийся только для отдельных коридоров.

Результаты. Получены показатели значимости ТК, включая объемы транспортной работы в соотношении к их суммарной протяженности. Приведен пример применения транспортной модели Иркутской агломерации для решения задач по формированию новых ТК.

Выводы. Предложенные подходы к формированию транспортной модели позволяют подготавливать необходимый инструментарий в условиях ограниченных возможностей проведения массовых обследований, а также максимально эффективно использовать имеющиеся транспортные модели, разработанные ранее для отдельных муниципалитетов и ТК, объединяя их в единую транспортную модель.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: транспортный коридор, оценка транспортного спроса, транспортная модель агломерации, инструменты транспортного планирования, характеристики городских территорий, интегрированное территориальное и транспортное планирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Левашев А.Г. Роль городских транспортных коридоров в формировании агломераций // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 10. С.1532–1544. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1532-1544

Автор, ответственный за переписку: Алексей Георгиевич Левашев, alexey.levashev@tl-istu.com.

The role of urban transport corridors in the formation of agglomerations

Alexey G. Levashev

Irkutsk National Research Technical University (INRTU); Irkutsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Successful economic and social development of urban territories requires a sustainable transport system that provides reliable connections between territories and a high level of their transport accessibility for the daily social and economic activities of the population. The most important elements of the transport and planning framework of the agglomeration are linear objects, represented by transport corridors, which determine the bulk of transport costs for population movements, and hence transport accessibility of territories. A high level of transport service in such important elements as transport corridors directly affects the formation of sustainable daily migrations of the population and the development potential of the adjacent territories, and therefore affects the formation of the agglomeration boundaries.

Materials and methods. For the territory of Irkutsk agglomeration, which includes Irkutsk city as the main core of agglomeration, satellite cities Angarsk and Shelekhov and the surrounding territory of Irkutsk district, approaches to the formation of a unified transport model of agglomeration as the main tool for assessing transport demand, analyzing the distribution of traffic flows and indicators of the effectiveness of measures to develop the territories of transport corridors and the territories served by them are proposed. The paper considers special cases of the constituent parts of the models for assessing

transport demand for movements between individual municipalities. An approach to estimating transport demand on adjacent conjugate transport corridors, previously used only for individual corridors is proposed.

Results. The significance indicators of transport corridors, including the volume of transport work in relation to their total length were obtained. The example of the application of transport model of Irkutsk agglomeration to solve the problems of the formation of new transport corridors is presented.

Conclusions. It is concluded that the proposed approaches to the formation of the transport model allow to prepare the necessary tools in conditions of limited opportunities for mass surveys, as well as maximize the use of existing transport models developed earlier for individual municipalities and transport corridors, combining them into a single transport model.

KEYWORDS: transport corridor, transport demand assessment, agglomeration transport model, transport planning tools, characteristics of urban areas, integrated territorial and transport planning

FOR CITATION: Levashev A.G. The role of urban transport corridors in the formation of agglomerations. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(10):1532-1544. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1532-1544 (rus.).

Corresponding author: Alexey G. Levashev, alexey.levashev@tl-istu.com.

ВВЕДЕНИЕ

Для успешного экономического и социального развития урбанизированных территорий требуется устойчивая транспортная система, обеспечивающая надежные связи между ними и высокий уровень доступности объектов активностей населения. Необходимость обеспечения экономического роста территорий является одной из основных причин инвестирования в транспортную инфраструктуру.

С целью обслуживания территорий нужна транспортная система, но и территории могут оказывать влияние на эффективность такой системы и ее функционирование. Следует учитывать особенности транспортного поведения населения и предпочтения людей в выборе целей и способов передвижений, а также территориальное расположение объектов обслуживания, которые они посещают. Например, концентрация рабочих мест или торговых точек вблизи крупного транспортного узла может повлиять на загрузку прилегающей улично-дорожной сети (УДС) и, как следствие, приведет к образованию транспортных очередей и повышению транспортных потерь.

Рассматривая территории в масштабе городской агломерации, наибольший интерес с точки зрения качества транспортного обслуживания представляют элементы основного транспортно-планировочного каркаса агломерации, включающего общегородские центры, крупные развязки, транспортно-пересадочные узлы, системы скоростных дорог и связи магистральных улиц, а также системы общественного и немоторизованного транспорта, обслуживающего эти территории [1–5].

Элементы основного транспортно-планировочного каркаса обслуживают до 80 % всех передвижений [3]. В результате снижения эффективности функционирования транспортно-планировочного каркаса агломерации в значительной степени растут вредные выбросы в окружающую среду, которые в свою очередь зависят и от транспортных задержек, и от средней скорости движения [6]. В результате снижаются возможности устойчивого развития городских территорий.

К наиболее значимым элементам транспортно-планировочного каркаса агломерации относятся линейные объекты, расположенные вдоль транспортных

коридоров (ТК), от которых зависит ключевая часть транспортных затрат на передвижения населения, а следовательно, транспортная доступность территорий. Несмотря на то что в городском транспортном планировании нет единого определения транспортного коридора, под данным термином понимаются сегменты городской транспортной системы, по которым осуществляются передвижение населения и перемещение грузов в определенном планировочном направлении с использованием комплекса взаимодополняющих городских путей сообщения.

В зарубежной практике особое внимание уделяется ТК и их роли в формировании городских агломераций. В современном руководстве по транспортному планированию США [7] приводится формулировка транспортного коридора — это относительно четко определенная географическая область, которая обслуживает транспортные потоки, обычно сосредоточенные вдоль одного или нескольких крупных транспортных объектов (например, автомагистрали, пригородной железнодорожной линии или скоростного автобусного сообщения).

Коридор часто трактуется в терминах обслуживания его отдельного участка, в пределах которого поездки имеют общую линейную направленность. При этом в рамках разработки плана развития ТК устанавливается потребность в развитии прилегающей территории, объектах или услугах между центрами активностей или другими конечными пунктами, а также транспортные инвестиции для обеспечения эффективного обслуживания существующих или планируемых урбанизированных территорий.

С точки зрения теории транспортных потоков под ТК понимается совокупность параллельных и конкурирующих элементов транспортных систем и видов транспорта с перекрестными связями, которые обслуживают поездки между двумя определенными пунктами и могут содержать несколько подсистем объектов: скоростные дороги, городские улицы, общественный транспорт, пешеходную и велосипедную инфраструктуру [7].

Приоритетные ТК с высокими пропускной способностью и качеством транспортного обслуживания, с несколькими видами транспорта называются основными (базовыми) транспортными коридорами. Коридоры, которые соединяют основные

ТК друг с другом и достигают конечных центров, называются промежуточными или ответвляющимися. Тот факт, что между двумя пунктами есть только одна дорога или улица, не делает ее ТК. На этом участке должно функционировать несколько видов транспорта и обслуживаться устойчивые транспортные потоки высокой интенсивности [7].

Транспортные коридоры рассматриваются как магистрали транспортных сетей, связывающие основные узлы и центры посредством слияния грузовых и пассажирских потоков. Чаще всего они находятся на пересечении экономических, демографических и географических процессов, поскольку выполняют как функции обслуживания рынка, так и функции соединения рынков. Таким образом, коридор как понятие не является неизменным во времени или пространстве, а скорее динамичным, зависящим от таких ключевых факторов, как экономический контекст, инвестиции в инфраструктуру, технологические изменения (например, информационные коридоры) и политика [8].

Важно отметить рост исследований и появления руководств и нормативных документов в области трансформирования городских и агломерационных коридоров с ориентиром на устойчивые виды транспорта [9]. Это объясняется тем, что на фоне растущего уровня автомобилизации сокращаются возможности качественного обслуживания населения только автомобильным транспортом, который должен быть дополнен надежными системами общественного транспорта с большой провозной способностью и высокими скоростями сообщения.

В таком случае в городской среде под коридором можно понимать территории, включающие сочетание торговых, рабочих мест и жилых помещений, развитых с общей более высокой плотностью, ориентированных вдоль магистральных улиц и дорог, обслуживаемых основными маршрутами общественного транспорта.

При этом высокий уровень транспортного обслуживания на таких важнейших элементах, как ТК, напрямую влияет на формирование устойчивых ежедневных миграций населения и потенциал развития прилегающих территорий, а следовательно, и на формирование границ агломерации. В условиях ограниченных исходных данных требуются подходы к созданию транспортной модели агломерации, а также максимальное эффективное использование имеющихся транспортных моделей, разработанных ранее для отдельных муниципалитетов и ТК, объединение их в единую транспортную модель, обеспечивающую экономию временных и денежных ресурсов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выполнен анализ современного состояния науки и практики в области планирования ТК в региональных, агломерационных и городских системах расселения.

В качестве территории рассмотрения принималась система расселения Иркутской агломерации, включающая г. Иркутск как основное ядро агломерации, города-спутники Ангарск и Шелехов и опоясывающую территорию Иркутского района (рис. 1).

Анализ распределения транспортных и пассажирских потоков проведен с помощью методов математического моделирования, в качестве основной информационной базы применены пространственные характеристики использования территорий в границах рассматриваемой агломерации, необходимые для транспортного моделирования (рис. 2) [10].

Подготовка инструмента транспортного моделирования для исследований и анализа показателей эффективности и приоритетности мероприятий по формированию новых ТК в границах Иркутской агломерации потребовала дополнительного изучения характеристик транспортной подвижности населения с применением анкетных опросов людей об их передвижениях внутри городов и между ними (рис. 3).

Для оценки транспортного спроса между городами в составе агломерации предложен подход к объединению функциональных моделей отдельных городов с учетом постоянных затрат времени на передвижения между их границами (рис. 4). Такой актуален при отсутствии возможности проведения крупномасштабных анкетных обследований, позволяющих получить достоверные статистические выборки данных о передвижениях населения из одного города в другой. Адекватность подхода подтверждается распределением передвижений по затратам времени, которое получено в результате опроса жителей Ангарска, совершивших передвижения в Иркутск по трудовым и культурно-бытовым целям на общественном и индивидуальном транспорте (см. рис. 3).

В таблице представлена предлагаемая совокупность моделей транспортного спроса, необходимая для формирования итоговой модели спроса городской агломерации (на примере Иркутской агломерации). В качестве необходимых исходных данных требуются территориальные характеристики (численность населения, места приложения труда и пр.), функции распределения передвижений по затратам времени (полученные в результате анкетных опросов в каждом отдельном муниципальном образовании), суммарные объемы передвижений между городами (получаемые в ходе транспортных обследований на границах городов и вдоль ТК).

Для отдельного муниципального образования, в частности для агломерационного центра, необходимо иметь детализированную модель спроса, учитывающую разные типы прибытия по культурно-бытовым целям (деагрегированная модель оценки спроса по прибытию).

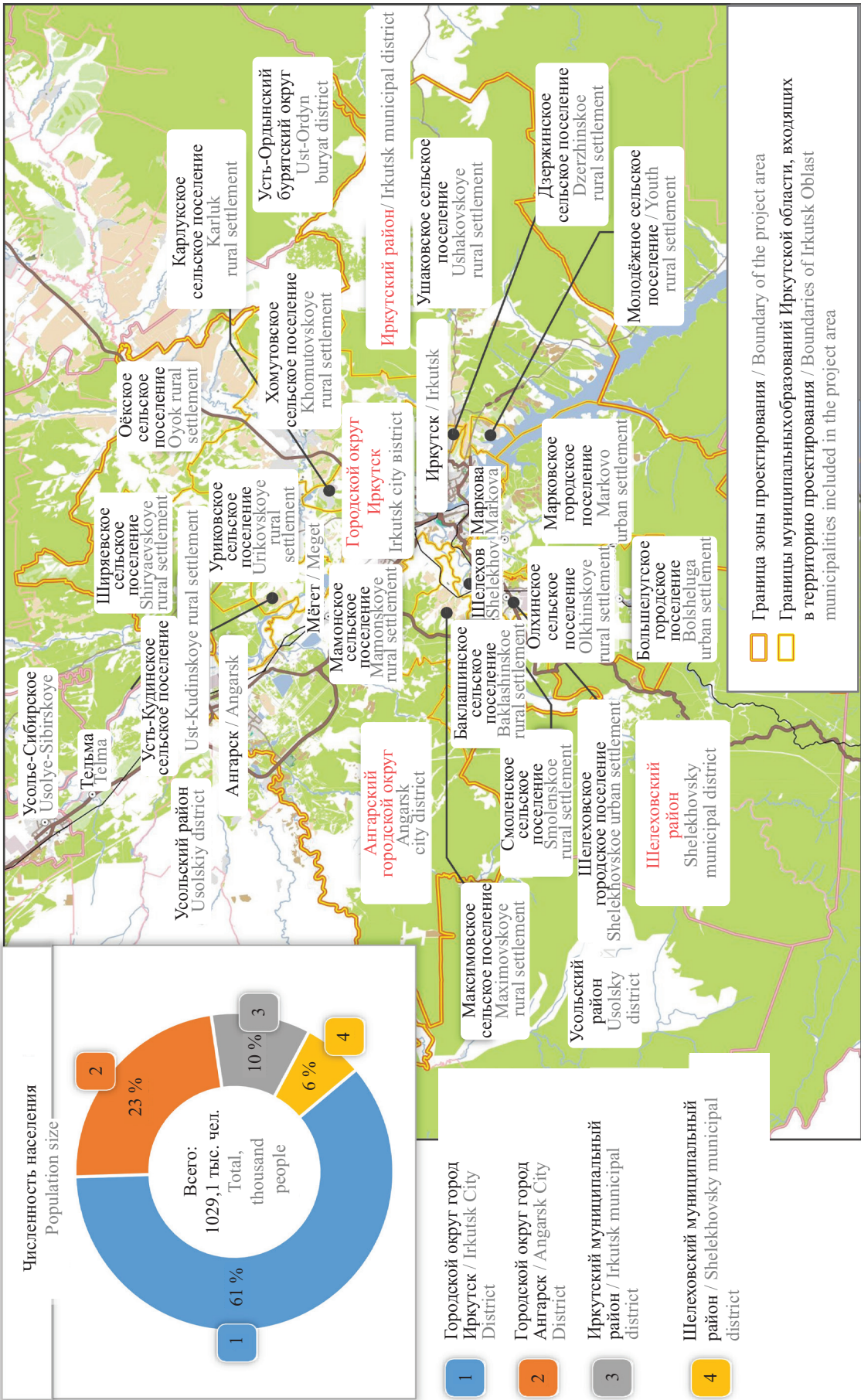


Рис. 1. Границы и состав Иркутской агломерации в рамках проектной работы по разработке документов транспортного планирования (2018 г.)
Fig. 1. Borders and composition of the Irkutsk agglomeration as part of the project work on the development of transport planning documents (2018)

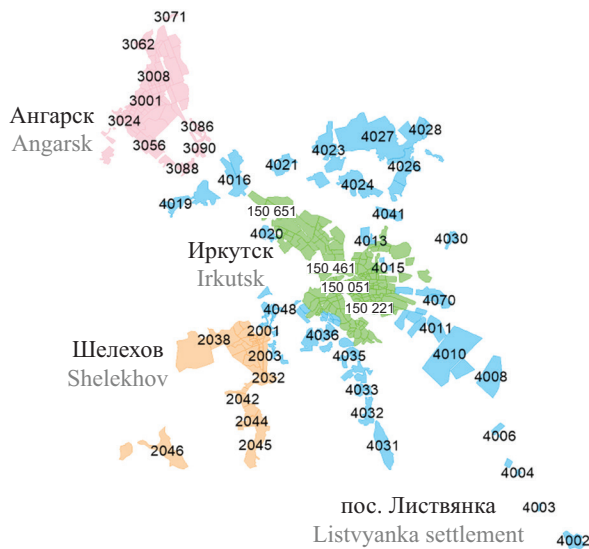


Рис. 2. Территориальное деление Иркутской агломерации на расчетные транспортные районы для оценки суммарных объемов генерации передвижений населения (нумерация расчетных транспортных районов: до 3000 — г. Шелехов, до 4000 — г. Ангарск, до 5000 — Иркутский район, более 5000 — г. Иркутск)

Fig. 2. Territorial division of the Irkutsk agglomeration into transportation analysis zones to estimate the total generation of population movements (numbering of transportation analysis zones up to 3,000 — Shelekhov, up to 4,000 — Angarsk, up to 5,000 — Irkutsk region, over 5,000 — Irkutsk)

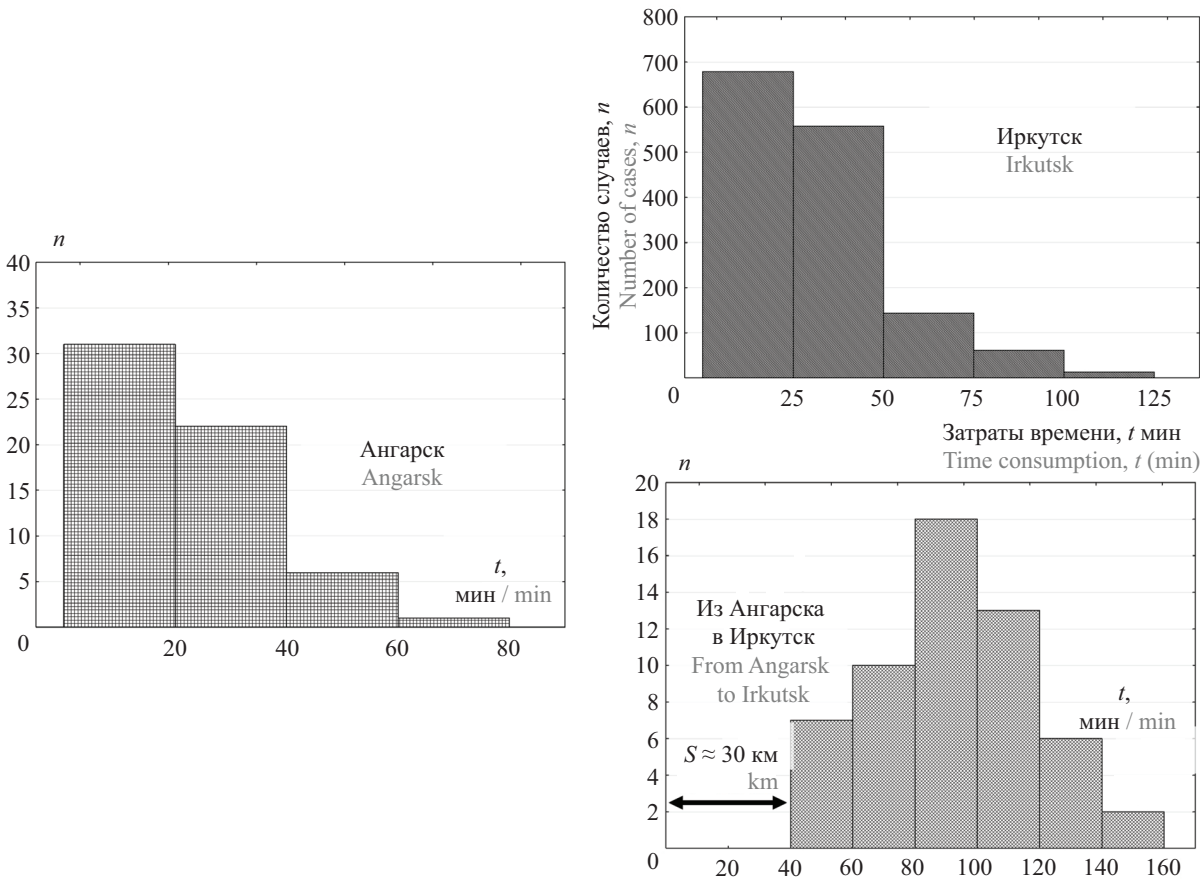


Рис. 3. Результаты изучения транспортного поведения населения Иркутской агломерации на основе опросов суточной мобильности при передвижениях внутри городов агломерации и между ними [10]

Fig. 3. The results of a study of the transport behavior of the population of the Irkutsk agglomeration based on surveys of daily mobility when travelling within and between the cities of the agglomeration [10]

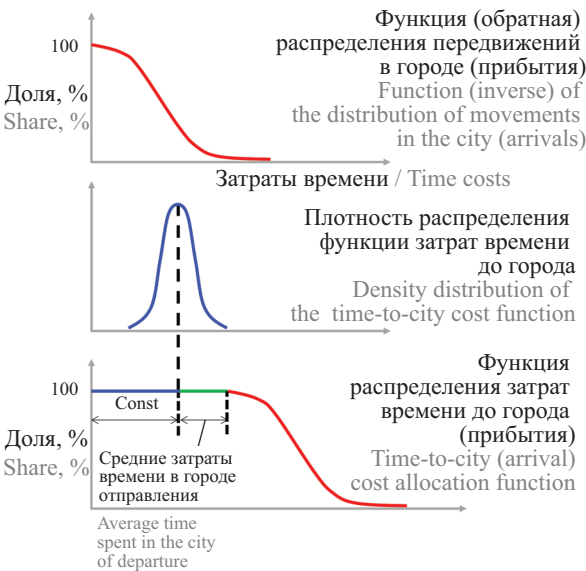


Рис. 4. Формирование функций распределения передвижений между городами

Fig. 4. Forming the functions of the trips’ distribution between cities

Еще одной особенностью такой совокупности моделей транспортного спроса агломерации является предлагаемый подход к оценке параметров функций распределений передвижений внутри агломерации (малые муниципальные образования вне крупных городов) и между агломерацией и крупными городами на основе методов восстановления матриц корреспонденций в ТК. Данные методы хорошо изучены и протестированы для решения задач в области планирования мероприятий по активному управлению транспортными потоками вдоль коридоров, разгрузке ТК за счет введения компенсационных мероприятий (планирование нового обхода г. Иркутска — рис. 5), а также для подготовки исходных данных для микромоделирования транспортных потоков на комплексных участках УДС [3, 11, 12].

Описанные выше методы восстановления матриц корреспонденций ранее рассматривались в границах одного коридора. В данном исследовании предлагается подход комбинирования результатов восстановления матриц корреспонденций отдельных коридоров в общую систему транспортного

Совокупность моделей транспортного спроса для построения общей модели агломерации

A set of transport demand models to build a general agglomeration model

Наименование/модель Name/model	Особенности/Параметры Features/Parameters	
Город 1 – город 2 City 1 – city 2	1. Территориальные характеристики расчетных районов городов / Territorial characteristics of the design areas of the cities 2. Функции распределений передвижений (по затратам времени) из города отправления в город прибытия / Functions of movements distributions (in terms of time) from the city of departure to the city of arrival 3. Суммарные объемы передвижений из города отправления в город прибытия / Total movements from the city of departure to the city of arrival	
Город 2 – город 1 City 2 – city 1		
Город 1 – город 3 City 1 – city 3		
Город 3 – город 1 City 3 – city 1		
Город 2 – город 3 City 2 – city 3		
Город 3 – город 2 City 3 – city 2		
Агломерация (внутри), включая кордоны Agglomeration (inside), including cordons	1. Территориальные характеристики / Territorial characteristics 2. Модель определения объемов передвижений внутри агломерации / A model for determining intra-agglomeration movements volumes 3. Функции распределений передвижений внутри агломерации (вне городов) / Functions of trips distributions within agglomeration (outside cities)	
Агломерация (включая кордоны) — города Agglomeration (including cordons) — cities	1. Территориальные характеристики / Territorial characteristics 2. Модель определения объемов передвижений в города в зависимости от удаленности / A model for determining the volume of movements to cities depending on remoteness 3. Функции распределений передвижений из агломерации в городах / Distribution functions of movements from agglomeration to cities	
Город 1 (внутри) City 1 (inside)	1. Территориальные характеристики / Territorial characteristics 2. Характеристики транспортного поведения / Characteristics of transportation behavior 3. Детализированная модель спроса, включая дезагрегированные модели оценки суммарных объемов передвижений по прибытию / Detailed demand model, including disaggregated models for estimating total movements volumes on arrival	
Город 2 (внутри) City 2 (inside)		
Город 3 (внутри) City 3 (inside)		

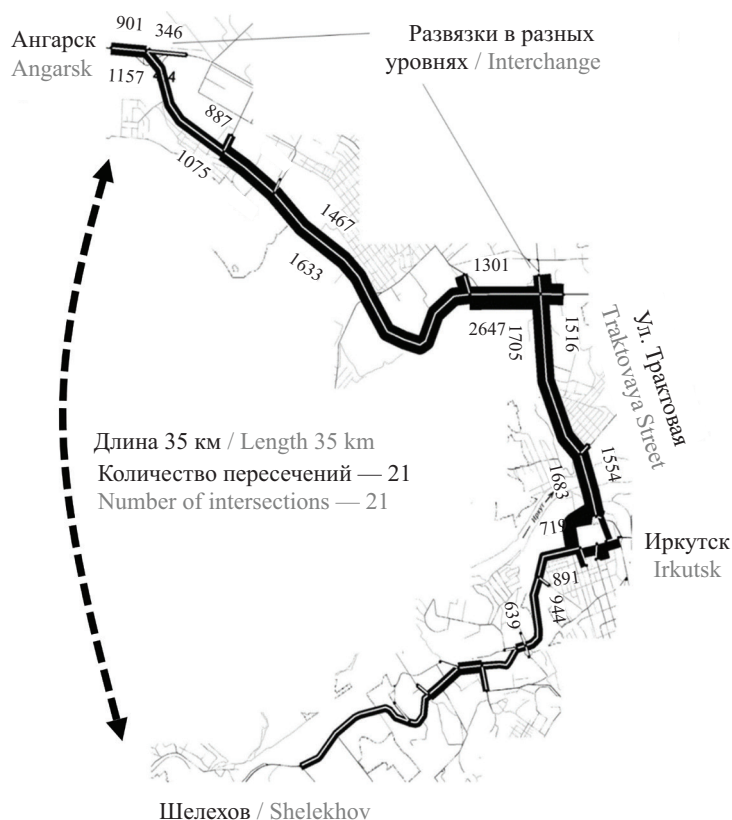


Рис. 5. Применение метода восстановления матрицы корреспонденций по замерам интенсивностей движения, авт/ч, вдоль транспортного коридора для принятия решений по планированию нового ТК в границах Иркутской агломерации в обход г. Иркутска (2009 г.) [11, 12]

Fig. 5. Application of the origin-destination matrix estimation method based on measurements of traffic flows, veh/h, along the transport corridor for making decisions on planning a new transport corridor within the Irkutsk agglomeration bypassing the city of Irkutsk (2009) [11, 12]

спроса внутри агломерации и между агломерацией и крупными городами (рис. 6).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Планирование агломерационного ТК должно учитывать региональные документы территориального и транспортного планирования. Своевременные и полноценные исследования в составе планирования коридоров могут предоставить важную информацию для принятия решений об инвестициях в совершенствование транспортной инфраструктуры агломерации, а также о планировании развития прилегающих территорий, которое благоприятно дополнит новую инфраструктуру.

Планирование ТК, как правило, направлено на решение определенных проблем, включая высокий уровень дорожно-транспортных происшествий [13], имеющих или прогнозируемых заторов, значительные изменения в развитии прилегающих территорий и моделях землепользования, и сопровождается рассмотрением сразу нескольких видов транспортных систем (способов передвижения). В результате планирования выявляются существующие и будущие мероприятия, требуемые для

обеспечения и поддержания устойчивого развития территорий, обслуживаемых ТК.

Протяженность коридоров может варьироваться от нескольких километров в городской черте до сотен километров в масштабах региона. Протяженность и особенности ТК могут определять глубину рассмотрения при планировании. При этом территория, необходимая для анализа транспортных эффектов, будет гораздо шире, чем территория в непосредственной близости к коридору.

Одна из актуальных тем исследований — поиск границ ТК, где формируются основные транспортные нагрузки при передвижении пользователей индивидуального, пассажирского, грузового транспорта, а также немоторизованных способов передвижений. В качестве инструментов определения границ коридоров применяются GPS-данные и сведения сотовых операторов о траекториях передвижения населения.

Распределение транспортных потоков по УДС Иркутской агломерации, полученное по результатам транспортного моделирования, позволяет оценить роль участков с наибольшими транспортными нагрузками (рис. 7). Например, участки УДС с интенсивностью движения более 500 авт/ч

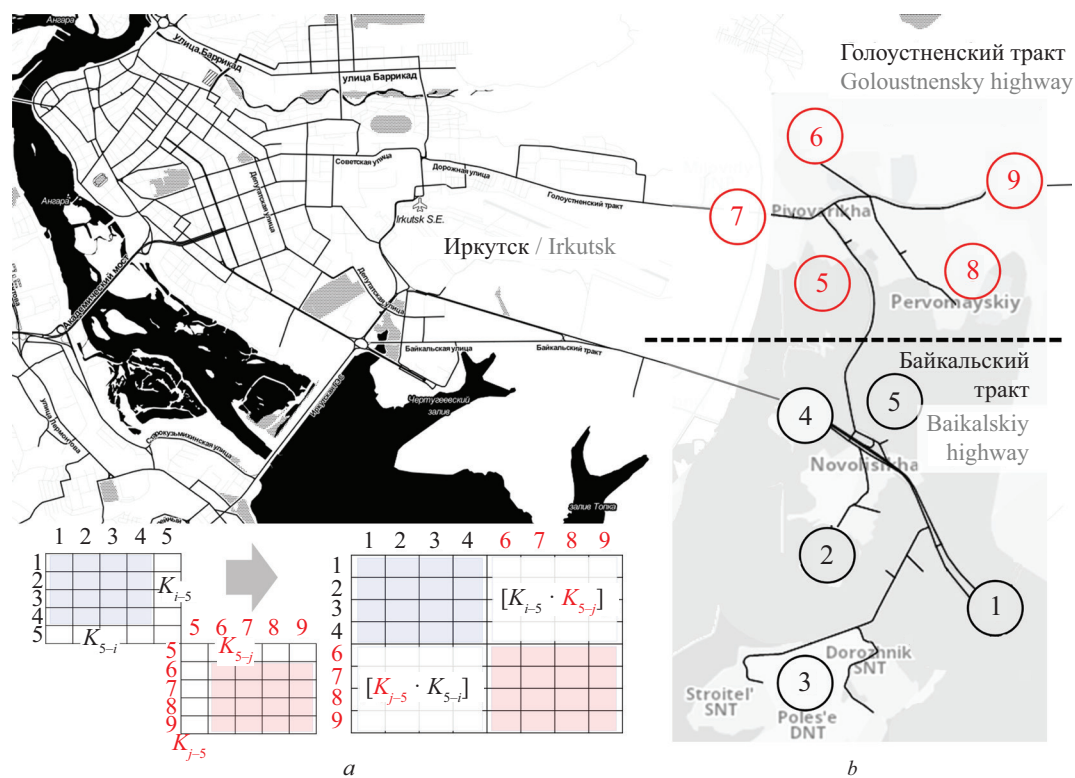


Рис. 6. Подход к формированию единой матрицы корреспонденций для смежных сопряженных транспортных коридоров: *a* — фрагменты двух транспортных коридоров Иркутского района на подходах к Иркутску; *b* — метод перехода от двух оценок матриц корреспонденций отдельных коридоров к единой матрице корреспонденций

Fig. 6. Approach to forming a single correspondence matrix for adjacent contiguous transport corridors: *a* — fragments of two transport corridors of Irkutsk region on the approaches to Irkutsk; *b* — method of transition from two estimates of correspondence matrices of individual corridors to a single correspondence matrix

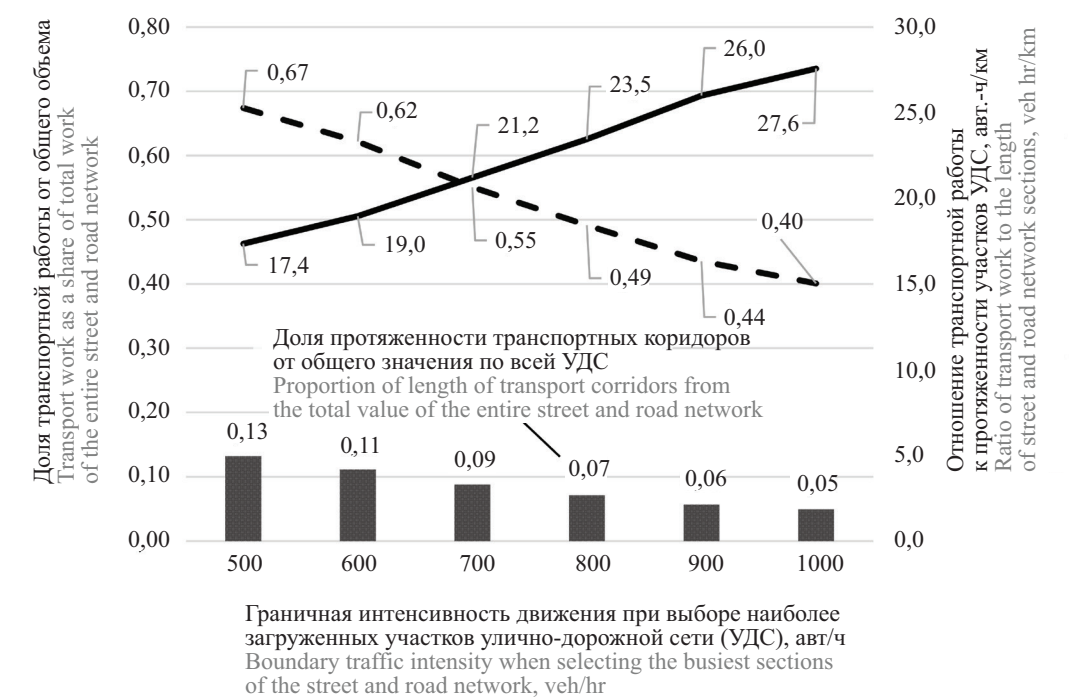


Рис. 7. Анализ работы участков улично-дорожной сети, интенсивность движения на которых в утренний час пик не менее заданного значения, авт/ч

Fig. 7. Analysis of the sections of the roads and streets network, the traffic flows on which in the morning rush hour is not less than the specified value, veh/hr

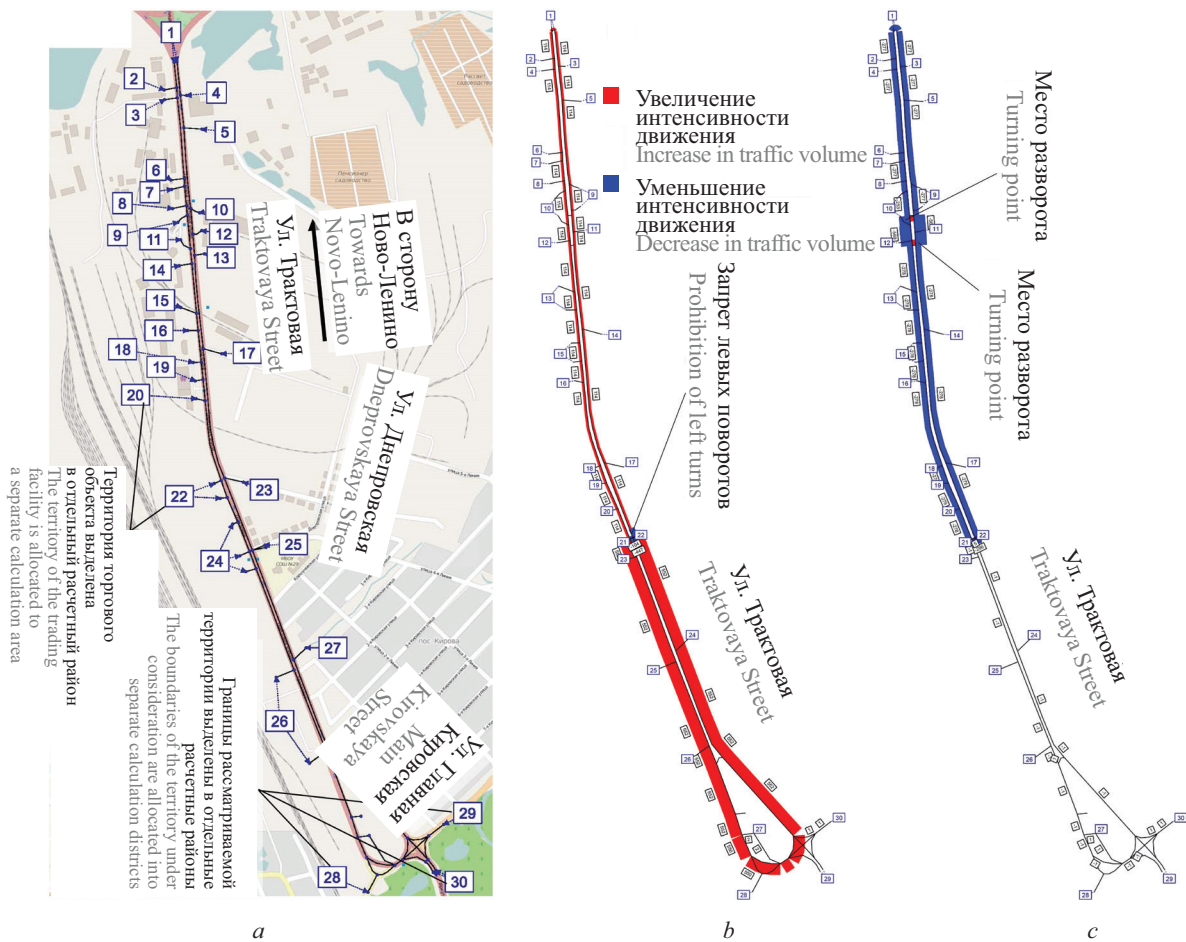


Рис. 8. Анализ транспортных потоков в границах городского коридора на участке ул. Тракторная (г. Иркутск, 2015 г.): *a* — разработка транспортной модели с выбором примыканий и подходов на перекрестках в качестве расчетных транспортных районов; *b* — прирост транспортных нагрузок в случае полного ограничения доступа и увеличения перепробега транспортных средств, обслуживающих крупный торговый объект, авт/ч; *c* — снижение транспортных нагрузок при реализации планировочных решений по организации доступа к территории рассматриваемого торгового объекта, авт/ч

Fig. 8. Analysis of traffic flows within the urban corridor on Traktovaya St. (Irkutsk, 2015): *a* — development of a transport model with the choice of junctions and approaches at intersections as transportation analysis zones; *b* — increase in traffic loads in case of complete limitation of access and increasing overrun of vehicles serving a large retail facility, veh/h; *c* — reduction of transport loads in case of implementation of urban design solutions for access to the territory of the retail facility, veh/h

по протяженности составляют лишь 13 % от общей протяженности всех участков УДС в границах рассматриваемой агломерации, при этом их транспортная работа — 67 % авт.-ч/км. Участки с интенсивностью движения более 1000 авт./ч составляют по протяженности лишь 5 %, но выполняют транспортную работу на 27,6 %.

Таким образом, участки с большими значениями транспортной нагрузки при соотношении с долей занимаемой протяженности имеют большее влияние на общесетевые показатели функционирования транспортной системы агломерации. Определение соответствующего правила выбора граничных значений интенсивностей движения для выделения основных ТК и выявления наиболее важных участков внутри коридоров позволит использовать данные о транспортных потоках в качестве исходной информации для решения указанной задачи,

в том числе данные, полученные в результате транспортного моделирования.

В связи с особой значимостью ТК при выполнении транспортно-градостроительного планирования появился ряд концепций, включая концепции интегрированного управления транспортными коридорами и их обслуживание (Integrated corridor management — ICM); городских коридоров активностей, ориентированных на использование общественного транспорта (Urban activity corridors, transit oriented development — TOD); полноценных улиц и мультимодального уровня обслуживания для учета не только пользователей индивидуального транспорта (Complete streets, multimodal level of service — MMLOS); автоматизированного управления транспортными потоками (Active traffic management — ATM); анализа оценки негативного влияния развивающейся территории на загрузку

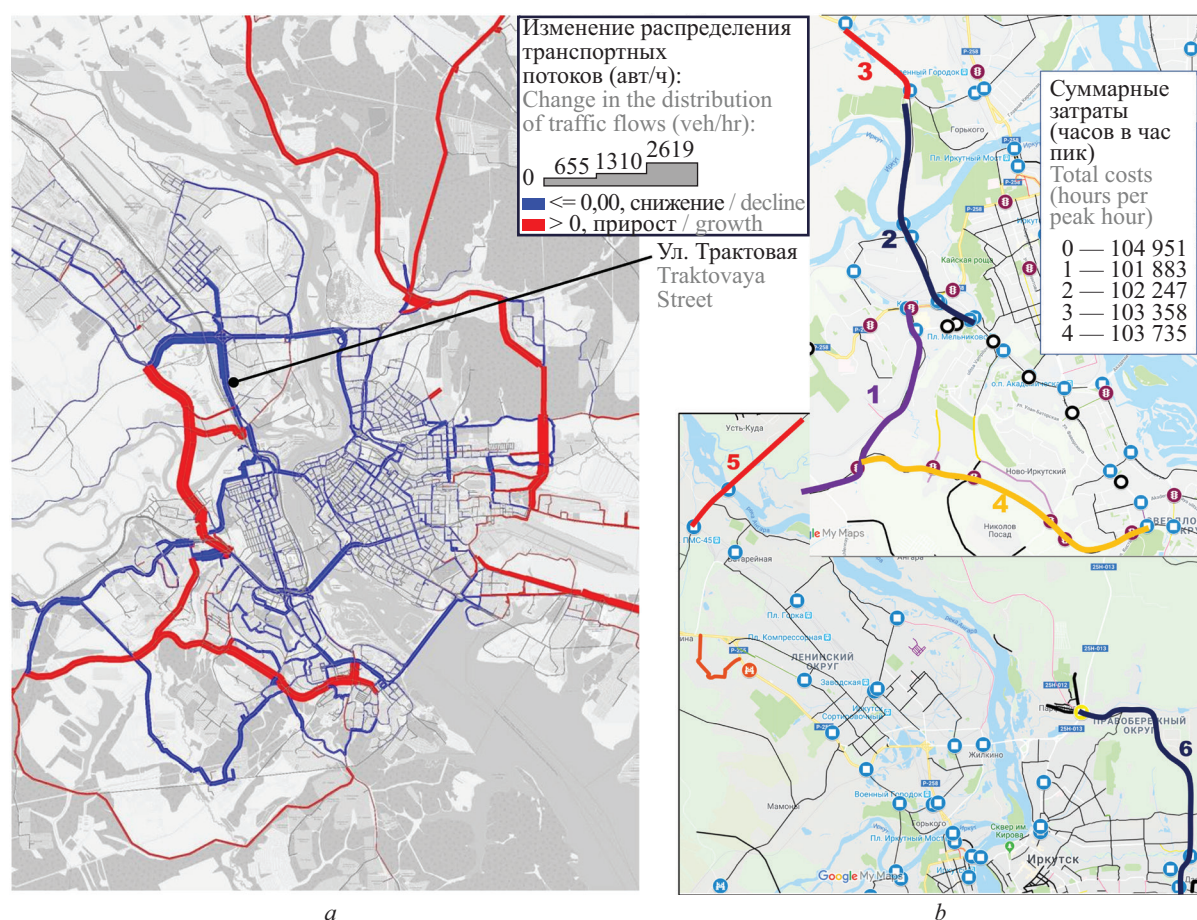


Рис. 9. Разработка мероприятий по формированию новых транспортных коридоров в границах Иркутской агломерации (2018 г.): *a* — анализ изменения транспортных потоков на основе транспортной модели; *b* — очередность мероприятий по результатам анализа эффективности отдельных транспортных коридоров для всей транспортной системы агломерации на основе показателя суммарных затрат времени на передвижения населения

Fig. 9. Development of measures to form new transport corridors within the Irkutsk agglomeration (2018): *a* — analysis of changes in traffic flows based on a transport model; *b* — prioritization of measures based on the results of the efficiency analysis of individual transport corridors for the entire transport system of the agglomeration based on the total amount of time spent on population movements

транспортного коридора (Traffic impact analysis — TIA); регулирования доступа от территорий к улично-дорожной сети (Access management, access control). Особенно выделяется область изучения интегрированных территориально-транспортных моделей оценки транспортного спроса (Land-use transportation models — LUTM) [14–23].

Качество планирования мероприятий внутри ТК зависит от уровня детализации соответствующего инструмента, под которым понимается модель оценки транспортного спроса и показателей эффективности работы ТК. На рис. 8 представлены фрагменты моделирования транспортных потоков на участке одного из ключевых ТК г. Иркутска (ул. Тракторная) в рамках решения поиска доступа к территории крупного торгового кластера, расположенного вдоль коридора. Введение полного ограничения левых поворотов за счет обустройства разделительного ограждения привело к увеличению перепробега транспортных средств посетителей

и поставщиков и увеличению транспортной нагрузки коридора. В результате рассмотрения альтернативных вариантов организации доступа выбран оптимальный, который позволил снизить транспортные нагрузки. Планировочное решение коридора определялось на основе полученных транспортных нагрузок (реализовано в 2015 г.).

Следует отметить, что с целью решения описанной выше задачи была разработана модель участка ТК, которая дала возможность оценивать перераспределение потоков лишь в границах его протяженности. Для решения более сложных задач, включая планирование новых ТК и другие случаи, когда требуется детальнее учитывать общегородские и агломерационные эффекты, необходимо наличие городской транспортной модели или модели всей агломерации. На рис. 9 показан результат ранжирования шести планируемых участков ТК агломерации (включая городские обходы). Данные участки были разделены на две группы: первая

(участки 1–4) и вторая очереди (участки 5 и 6), при этом приоритетность реализации участков первой очереди определялась на основе показателей эффективности (затраты времени населения на передвижения), полученных в результате применения транспортной модели Иркутской агломерации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Транспортные коридоры городской агломерации играют ключевую роль в формировании ее границ. Процесс планирования территории, отводимой для размещения в коридоре необходимых транспортных систем, а также для использования

территорий, обслуживаемых ТК, требует наличия соответствующего инструментария в виде транспортных моделей. Уровень детализации таких моделей зависит от сложности решаемой задачи.

Предложенные подходы к формированию транспортной модели агломерации позволяют подготавливать необходимый инструментарий в условиях ограниченных возможностей проведения массовых обследований, а также максимально эффективно использовать имеющиеся транспортные модели, разработанные ранее для отдельных муниципалитетов и транспортных коридоров, объединяя их в единую транспортную модель.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Vlasov D.N., Danilina N.V., Terekhova A.I.* Public transport transit hubs ranking for sustainable urban development // *Contemporary Problems of Architecture and Construction*. 2021. Pp. 400–402. DOI: 10.1201/9781003176428-77

2. *Михайлов А.Ю.* К вопросу выбора политики развития центра Иркутска и реконструкции его улично-дорожной сети // *Известия Иркутской государственной экономической академии*. 2004. № 3. С. 37–40. EDN KBEPJZ.

3. *Михайлов А.Ю., Головных И.М.* Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей городов. Новосибирск : Наука, 2004. 267 с. EDN TOHRLL.

4. *Yakimov M.* Methods for spatial analysis of city structure distribution to estimate city agglomeration boundaries // *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. Pp. 794–800. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.080

5. *Левашев А., Шаров М., Лебедева О., Лыткина А., Бутузова А., Прокофьева О. и др.* Транспортное планирование в развитии Иркутской агломерации // *Проект Байкал*. 2021. Т. 18. № 70. С. 94–98. DOI: 10.51461/projectbaikal.70.1896. EDN QBYHCB.

6. *Левашев А.Г., Павлова О.Р.* Управление транспортным спросом для снижения экологического воздействия транспорта на окружающую среду // *Экология урбанизированных территорий*. 2021. № 3. С. 109–116. DOI: 10.24412/1816-1863-2021-3-109-115. EDN JMYGJF.

7. *Transportation Planning Handbook*, 4th Ed. ITE (Institute of Transportation Engineers), 2016. 1200 p.

8. *Öberg M., Nilsson K.L., Johansson C.* Major transport corridors: the concept of sustainability in EU documents // *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 25. Pp. 3694–3702. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.05.339

9. *Muhammad I., Widyaningsih N.* Analysis of determination Transit Oriented Development areas (TOD) at Light Rail Transit (LRT) stations in Palembang City // *Astonjadro*. 2023. Vol. 12. Issue 1. P. 260. DOI: 10.32832/astonjadro.v12i1.8587

10. *Levashev A.* Formation of the transport model of urban agglomeration // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 212. P. 05001. DOI: 10.1051/mateconf/201821205001

11. *Тебеньков С.Е., Левашев А.Г.* Результаты оценки распределения транспортных потоков в транспортных коридорах // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2011. № 10 (57). С. 120–127. EDN OIODQT.

12. *Levashev A., Mikhailov A., Golovnykh I.* Modeling parking based trips // *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2013. DOI: 10.2495/SC130912

13. *Solodkiy A., Gorev A.* Determination of basic factors for the successful implementation of the safe and high-quality roads project // *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. Pp. 741–746. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.097

14. *Sarri P., Kaparias I., Preston J., Simmonds D.* Using Land Use and Transportation Interaction (LUTI) models to determine land use effects from new vehicle transportation technologies; a regional scale of analysis // *Transport Policy*. 2023. Vol. 135. Pp. 91–111. DOI: 10.1016/j.tranpol.2023.03.012

15. *Anjomani A.* An integrated land-use/transportation forecasting and planning model: A metropolitan planning support system // *Journal of Transport and Land Use*. 2021. Vol. 14. Issue 1. Pp. 65–86. DOI: 10.5198/jtlu.2021.1412

16. *Kuehnel N., Ziemke D., Moeckel R.* Traffic noise feedback in agent-based Integrated Land-Use/Transport Models // *Journal of Transport and Land Use*. 2021. Vol. 14. Issue 1. DOI: 10.5198/jtlu.2021.1852

17. *Levashev A.* Application of geoinformation technologies for the transportation demand estimation // *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 20. Pp. 406–411. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.066

18. Levashev A., Mikhailov A., Sharov M. Special generators in tasks of transportation demand assessment // *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. Pp. 434–439. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.119
19. Levashev A., Pavlova O., Sokolova N., Chelpanova I. Principles of allocation of special transportation analysis zones // *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 68. Pp. 876–883. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.124
20. Altan M., Ayözen Y.E. The effect of the size of traffic analysis zones on the quality of transport demand forecasts and travel assignments // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2018. DOI: 10.3311/PPci.11885
21. Chen Y., Zhang Z., Liang T. Assessing urban travel patterns: An analysis of traffic analysis zone-based mobility patterns // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. Issue 19. P. 5452. DOI: 10.3390/su11195452
22. Soltani A. The influence of urban physical form on trip generation, evidence from metropolitan shiraz, Iran // *Indian Journal of Science and Technology*. 2011. Vol. 4. Issue 9. Pp. 1168–1174. DOI: 10.17485/ijst/2011/v4i9.24
23. Wang S., Sun L., Rong J., Yang Z. Transit Traffic Analysis Zone Delineating Method Based on Thiessen Polygon // *Sustainability*. 2014. Vol. 6. Issue 4. Pp. 1821–1832. DOI: 10.3390/su6041821

Поступила в редакцию 26 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 6 августа 2023 г.

Одобрена для публикации 6 августа 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Алексей Георгиевич Левашев** — кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта; **Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)**; 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, РИНЦ ID: 366053, Scopus: 56067264100, ResearcherID: 11677702, ORCID: 0000-0002-9989-6497; alexey.levashev@tl-istu.com.

REFERENCES

1. Vlasov D.N., Danilina N.V., Terekhova A.I. Public transport transit hubs ranking for sustainable urban development. *Contemporary Problems of Architecture and Construction*. 2021; 400–402. DOI: 10.1201/9781003176428-77
2. Mikhailov A.Yu. About choosing development policy of Irkutsk center and its street and road network reconstruction. *Proceedings of the Irkutsk State Academy of Economics*. 2004; 3:37–40. EDN KBEPJZ. (rus.).
3. Mikhailov A.Y., Golovnykh I.M. *Modern tendencies of design and reconstruction of street-road networks of cities*. Novosibirsk, Nauka, 2004; 267. EDN TOHRL. (rus.).
4. Yakimov M. Methods for spatial analysis of city structure distribution to estimate city agglomeration boundaries. *Transportation Research Procedia*. 2018; 36:794–800. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.080
5. Levashev A., Sharov M., Lebedeva O., Lytkina A., Butuzova A., Prokofieva O., et al. The role of transport planning in the sustainable development of the Irkutsk agglomeration. *Project Baikal*. 2021; 18(70):94–98. DOI: 10.51461/projectbaikal.70.1896. EDN QBYHCB. (rus.).
6. Levashev A.G., Pavlova O.R. Transportation demand management to reduce environmental impact of transport. *Ecology of urbanized territories*. 2021; 3:109–116. DOI: 10.24412/1816-1863-2021-3-109-115. EDN JMYGJF. (rus.).
7. *Transportation Planning Handbook, 4th Edition*. ITE (Institute of Transportation Engineers), 2016; 1200.
8. Öberg M., Nilsson K.L., Johansson C. Major transport corridors: the concept of sustainability in EU documents. *Transportation Research Procedia*. 2017; 25:3694–3702. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.05.339
9. Muhammad I., Widyaningsih N. Analysis of determination Transit Oriented Development areas (TOD) at Light Rail Transit (LRT) stations in Palembang City. *Astonjadro*. 2023; 12(1):260. DOI: 10.32832/astonjadro.v12i1.8587
10. Levashov A. Formation of the transport model of urban agglomeration. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 212:05001. DOI: 10.1051/mateconf/201821205001
11. Tebenkov S., Levashev A. Assessment results of traffic flows distribution in transport corridors. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2011; 10(57):120–127. EDN OIODQT. (rus.).
12. Levashev A., Mikhailov A., Golovnykh I. Modelling parking based trips. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2013. DOI: 10.2495/SC130912
13. Solodkiy A., Gorev A. Determination of basic factors for the successful implementation of the safe and high-quality roads project. *Transportation Research Procedia*. 2018; 36:741–746. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.097
14. Sarri P., Kaparias I., Preston J., Simmonds D. Using Land Use and Transportation Interaction (LUTI) models to determine land use effects from new vehicle transportation technologies; a regional scale of analysis. *Transport Policy*. 2023; 135:91–111. DOI: 10.1016/j.tranpol.2023.03.012
15. Anjomani A. An integrated land-use/transportation forecasting and planning model: A metropolitan planning support system. *Journal of Transport and Land Use*. 2021; 14(1):65–86. DOI: 10.5198/jtlu.2021.1412
16. Kuehnelt N., Ziemke D., Moeckel R. Traffic noise feedback in agent-based Integrated Land-Use/

Transport Models. *Journal of Transport and Land Use*. 2021; 14(1). DOI: 10.5198/jtlu.2021.1852

17. Levashev A. Application of geoinformation technologies for the transportation demand estimation. *Transportation Research Procedia*. 2017; 20:406-411. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.066

18. Levashev A., Mikhailov A., Sharov M. Special generators in tasks of transportation demand assessment. *Transportation Research Procedia*. 2018; 36:434-439. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.119

19. Levashev A., Pavlova O., Sokolova N., Chelpanova I. Principles of allocation of special transportation analysis zones. *Transportation Research Procedia*. 2023; 68:876-883. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.124

20. Altan M., Ayözen Y.E. The effect of the size of traffic analysis zones on the quality of transport

demand forecasts and travel assignments. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2018. DOI: 10.3311/PPci.11885

21. Chen Y., Zhang Z., Liang T. Assessing urban travel patterns: An analysis of traffic analysis zone-based mobility patterns. *Sustainability*. 2019; 11(19):5452. DOI: 10.3390/su11195452

22. Soltani A. The influence of urban physical form on trip generation, evidence from metropolitan Shiraz, Iran. *Indian Journal of Science and Technology*. 2011; 4(9):1168-1174. DOI: 10.17485/ijst/2011/v4i9.24

23. Wang S., Sun L., Rong J., Yang Z. Transit traffic analysis zone delineating method based on Thiessen polygon. *Sustainability*. 2014; 6(4):1821-1832. DOI: 10.3390/su6041821

Received June 26, 2023.

Adopted in revised form on August 6, 2023.

Approved for publication on August 6, 2023.

B I O N O T E S: **Alexey G. Levashev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automotive Transport; **Irkutsk National Research Technical University (INRTU)**; 83 Lermontova st., Irkutsk, 664074, Russian Federation; ID RSCI: 366053, Scopus: 56067264100, ResearcherID: 11677702, ORCID: 0000-0002-9989-6497; alexey.levashev@tl-istu.com.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.046.2

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1545-1555

Метод вероятностного анализа надежности элементов конструкций на основе граничных функций распределения

Сергей Александрович Соловьев, Анастасия Андреевна Соловьева

Вологодский государственный университет (ВoГУ); г. Вологда, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование направлено на развитие методов оценки и анализа надежности элементов строительных конструкций в практических задачах, когда статистическая информация о случайных величинах может быть неполной или ограниченной. В таких случаях затруднительно выявить конкретный вид точной функции распределения случайной величины или дать точную оценку параметру распределения, так как возникает необходимость учесть эпистемологическую неопределенность, помимо алеаторной.

Материалы и методы. Для эффективного моделирования двух видов неопределенностей предлагается использовать граничные функции распределения случайной величины, которые формируют р-блок (probability box). Р-блоки позволяют учесть как неопределенность, вызванную естественной (природной) изменчивостью случайных параметров, так и неопределенность, вызванную недостатком знаний о случайной величине (количество контрольных образцов, точность измерительных приборов и т.д.).

Результаты. Предложен новый вид р-блока, построенный на неравенстве Дворецкого – Кифера – Вулфовица и неравенстве П.Л. Чебышёва, что позволяет сформировать две граничные функции распределения по данным выборочной совокупности. На численном примере показан подход к арифметическим операциям с р-блоками, которые дают возможность привести сложные математические модели к более простым и оценить вероятность безотказной работы в интервальной форме. Разница между аналитическим и численным решением по примеру составила 0,9 %.

Выводы. Граничные функции распределения позволяют более осторожно и достоверно подойти к анализу надежности строительных конструкций. Результат оценки надежности с использованием р-блоков представлен в интервальной форме. Если интервал получается слишком широким и неинформативным, то необходимо повысить количество или качество статистической информации или увеличить сечения элементов строительных конструкций для достижения нижней границы интервала требуемого уровня надежности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: надежность, вероятностное проектирование, р-блоки, вероятность отказа, критерий Колмогорова – Смирнова, неопределенность, безопасность

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам, редакционной коллегии и сотрудникам редакции за обсуждение и подготовку к публикации настоящей работы. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01035 (URL: <https://rscf.ru/project/23-79-01035/>).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Соловьев С.А., Соловьева А.А. Метод вероятностного анализа надежности элементов конструкций на основе граничных функций распределения // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 10. С. 1545–1555. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1545-1555

Автор, ответственный за переписку: Сергей Александрович Соловьев, solovevsa@vogu35.ru.

Method of structural reliability analysis based on boundary distribution functions

Sergey A. Solovev, Anastasia A. Soloveva

Vologda State University (VSU); Vologda, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The research is aimed at the development of methods for assessing and analyzing the structural reliability of elements of building structures in practical tasks when statistical data about random variables may be incomplete or limited. In such cases, it is difficult to identify the specific type of the exact cumulative distribution function of a random variable or to give an accurate estimate of the distribution parameter, because there is a need to take into account epistemic uncertainty in addition to aleatory uncertainty.

Materials and methods. For effective modelling of two types of uncertainties, it is proposed to use boundary distribution functions of a random variable that form a p-box (probability box). P-boxes take into account both types of uncertainty: caused by natural variability of random parameters and uncertainty caused by lack of knowledge about the random variable (number of control samples, accuracy of measuring instruments, etc.).

Results. The paper proposes a new type of p-box based on the Dvoretzky – Kiefer – Wolfowitz inequality and Chebyshev's inequality, which form two boundary distribution functions based on the sample population data. The numerical example shows the approach to arithmetic operations with p-boxes, which make it possible to bring complex mathematical models to simpler ones and estimate the failure probability in an interval form. The difference between the analytical and numerical solution for the example is 0.9 %.

Conclusions. Boundary distribution functions form a more cautious and reliable approach to the structural reliability analysis. The result of reliability assessment using p-boxes is presented in an interval form. If the interval turns out to be too wide and uninformative, then it is necessary to increase the quantity or quality of statistical data or to increase the cross-sections of structural elements to achieve the lower limit of the interval of the required reliability level.

KEYWORDS: reliability, probabilistic design, p-boxes, failure probability, Kolmogorov – Smirnov criterion, uncertainty, safety

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the reviewers, editorial board and editorial staff for discussing and preparing this paper for publication. The research was funded by Russian Science Foundation (RSF) No. 23-79-01035 (URL: <https://rscf.ru/en/project/23-79-01035/>).

FOR CITATION: Solovlev S.A., Soloveva A.A. Method of structural reliability analysis based on boundary distribution functions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(10):1545-1555. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1545-1555 (rus.).

Corresponding author: Sergey A. Solovlev, solovevsa@vogu35.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность строительного объекта — это его способность выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации. В настоящее время в РФ ключевым условием надежности строительных объектов служит выполнение требований (критериев) для всех учитываемых предельных состояний при действии наиболее неблагоприятных сочетаний расчетных нагрузок в течение расчетного срока службы. Такой подход — основа метода предельных состояний. Доктор технических наук, профессор О.В. Мкртычев [1] констатирует, что «Метод предельных состояний позволяет обеспечить необходимый уровень надежности зданий и сооружений, что подтверждается опытом проектирования, строительства и эксплуатации. Однако данный метод имеет ряд недостатков, например, невозможно сказать, какой уровень надежности в количественном измерении формируется в результате применения норм проектирования, одинаков ли этот уровень надежности для зданий и сооружений различных конструктивных схем и выполненных из различных материалов».

Развитием метода предельных состояний, который иначе называется полувероятностный подход, является полный вероятностный расчет на заданный индекс надежности или вероятность отказа. Как отмечено в фундаментальной работе по концепции обеспечения безопасности строительных конструкций [2]: «Опыт показал, что аналогичные конструкции, работающие в аналогичных условиях, не обязательно полностью или частично выходят из строя в одном и том же “возрасте”. Фактически, невозможно точно оценить действительный срок службы конструкции (т.е. как долго она будет работать без отказов); лучшее, что можно сделать — это оценить вероятность достижения или превышения определенного срока службы без отказов. Таким образом, надежность может быть выражена в ве-

роятностных терминах, включая как конструктивную безопасность, так и эксплуатационную пригодность».

Теория надежности строительных конструкций активно развивается в последнее десятилетие, главным образом за рубежом [3–5]. Разработаны различные методы определения индекса надежности и вероятности безотказной работы с использованием новых методов оптимизации и программирования: кригинг, полиномиальный хаос, байесовские сети, генетические алгоритмы и др. Одна из актуальных проблем, с которой сталкиваются исследователи и инженеры в практических задачах анализа надежности, — эффективное моделирование алеаторной и эпистемологической неопределенностей.

Вероятностные методы или методы теории нечетких множеств требуют наличия функции распределения вероятностей или функции принадлежности для количественной оценки надежности. Авторы публикации [6] пишут: «Архимед говорил: “Дайте мне точку опоры, и я переверну землю”. В отличие от этого утверждения, аналитик, основывающий свои расчеты на вероятностных методах или нечетких множествах, по сути, произносит: “Дайте мне плотность распределения вероятностей или функцию принадлежности величин, и я оценю безопасность конструкции”».

Алеаторная неопределенность (aleatory uncertainty) и эпистемологическая неопределенность (epistemic uncertainty). Алеаторная неопределенность возникает вследствие объективной стохастической природы явлений, например снеговая нагрузка, неоднородность физико-механических свойств материалов и др. Эпистемологическая неопределенность появляется из-за недостатка статистической информации или неточности математических моделей, описывающих явление: событие, свойство и т.д. Классические методы анализа надежности элементов строительных конструкций, построенные на базе теории вероятностей и мате-

математической статистики, моделируют в основном лишь алеаторную неопределенность. «Теория вероятностей рассматривается как наиболее эффективный инструмент для описания случайной неопределенности при оценке надежности конструкций. За последние десятилетия было разработано множество методов оценки надежности, основанных на теории вероятностей. Хотя эти вероятностные методы целесообразны при количественной оценке и прогнозировании неопределенности, когда на сооружение в основном влияет алеаторная неопределенность, они плохо работают в сценариях, связанных с большой эпистемологической неопределенностью. Например, распределение входных параметров может быть получено неточно из-за недостаточности выборочных данных» [7]. Таким образом, для достоверной оценки надежности строительных конструкций необходим учет как алеаторной, так и эпистемологической неопределенности данных.

Одним из эффективных инструментов для учета обоих типов неопределенностей являются р-блоки (p-boxes, probability boxes) [8–10]. Р-блок представляет собой две граничные функции распределения вероятностей случайной величины, формирующие область, внутри которой находится действительная, но наперед неизвестная функция распределения вероятностей.

В настоящей статье предлагается рассмотреть метод анализа надежности элементов строительных конструкций с использованием граничных функций распределения вероятностей. Представленный подход позволит более осторожно и достоверно подойти к оценке вероятности безотказной работы элементов строительных конструкций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В практических задачах анализа надежности зачастую возникает проблема неполной статисти-

ческой информации о контролируемых параметрах. В этом случае, например, для рассматриваемой случайной величины могут быть подобраны различные функции распределения, которые приведут к различным результатам расчета надежности, что вносит субъективность в процесс анализа надежности строительных конструкций. Одним из решений этой проблемы служит применение эмпирической информации для моделирования возможной области действительной функции распределения. Существуют различные способы построения данной области в зависимости от вида исходной статистической информации.

В труде [11] представлено неравенство, получившее название неравенство Дворецкого – Кифера – Вулфовица или неравенство ДКВ, которое отражает, насколько близка эмпирическая функция распределения вероятностей $F_n(x)$ к функции распределения $F(x)$, из которой получены эмпирические выборки:

$$\Pr\left(\sup_{x \in R} |F_n(x) - F(x)| > \varepsilon\right) \leq C \cdot e^{-2n\varepsilon^2}, \quad (1)$$

где n — количество испытаний/измерений в выборочной совокупности данных; ε — любое положительное число; C — неопределенный множитель-константа.

Математическое доказательство, что константа $C = 2$ приведено в работе [12].

На основе неравенства ДКВ (1) могут быть получены границы действительного распределения вероятностей в виде:

$$F_n(x) - \varepsilon \leq F(x) \leq F_n(x) + \varepsilon, \quad (2)$$

где $\varepsilon = \sqrt{\ln 2/\alpha/2n}$, α — доверительная вероятность.

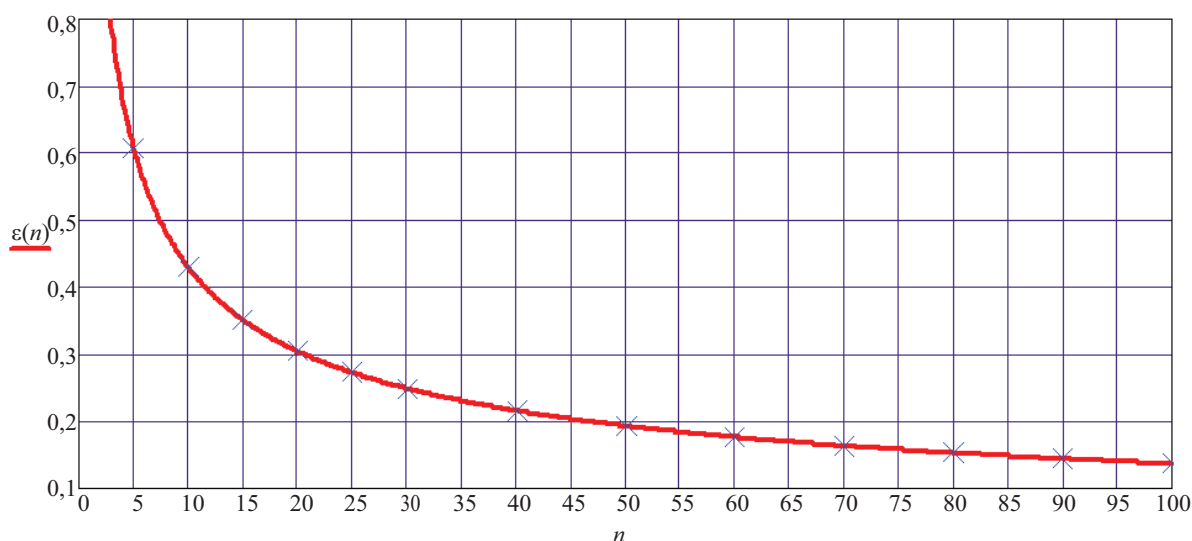


Рис. 1. Зависимость параметра ε от числа испытаний/измерений n

Fig. 1. Dependence of the ε on the number of tests/measurements n

На основе неравенства (1) можно утверждать, что действительная функция распределения вероятностей $F(x)$ будет находиться в указанном интервале с вероятностью $1 - \alpha$.

На рис. 1 представлена зависимость $\varepsilon(n) = \sqrt{\ln 2/\alpha/2n}$, маркерами отмечены значения статистики Колмогорова – Смирнова [13]. Как видно из рис. 1, зависимость $\varepsilon(n)$ по неравенству Дворецкого – Кифера – Вулфовица полностью совпадает со статистикой Колмогорова – Смирнова, которая традиционно представляется в табличной форме.

Граничные функции распределения вероятностей на основе неравенства ДКВ (2) или статистики Колмогорова – Смирнова можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \underline{F}(x) &= \max(F_n(x) - \varepsilon, 0); \\ \overline{F}(x) &= \min(F_n(x) + \varepsilon, 1). \end{aligned} \quad (3)$$

Внутри границ (3) будет находиться действительная, но неизвестная наперед, функция распределения вероятностей случайной величины. Границы (3) также называются р-блоком.

Преимуществом использования р-блоков как моделей случайных величин является отсутствие необходимости в получении полной статистической информации о случайной величине. В исследовании [14] отмечается, что в практических задачах анализа риска любую случайную величины можно ограничить некоторым интервалом. Все моменты любого ограниченного распределения конечны и, значит, существуют в математическом смысле. Следовательно, для таких статистических данных можно принять оценку (точную или интервальную) математического ожидания и среднеквадратического отклонения. Этой информации может быть достаточно для построения модели случайной величины в виде р-блока. Более того, при высоком значении нижней границы интервала вероятности безотказной работы будет отсутствовать необходимость уточнять законы распределения случайной величины и значения параметров этих законов.

Так, при наличии статистических данных о случайной величине в виде ее математического ожидания и среднеквадратического отклонения можно построить р-блок на основе неравенств П.Л. Чебышёва [15]:

$$\underline{F}_x(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < m_x + S_x; \\ 1 - \frac{S_x^2}{(x - m_x)^2}, & \text{если } x \geq m_x + S_x; \end{cases} \quad (4)$$

$$\overline{F}_x(x) = \begin{cases} \frac{S_x^2}{(x - m_x)^2}, & \text{если } x < m_x - S_x; \\ 1, & \text{если } x \geq m_x - S_x, \end{cases} \quad (5)$$

где m_x — математическое ожидание случайной величины X ; S_x — среднеквадратическое отклонение случайной величины X .

В работе [15] предложены уточненные граничные функции распределения (уточнение производится за счет указания интервала изменчивости случайной величины) с аналитическим видом:

$$\overline{F}_x(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } \frac{x \leq m_x + S_x^2}{m_x - \bar{x}}; \\ \frac{1 - [b(1+a) - c - b^2]}{a}, & \text{если } \frac{m_x + S_x^2}{m_x - \bar{x}} < x < \frac{m_x + S_x^2}{(m_x - \underline{x})}; \\ \frac{1}{[1 + S_x^2 / (x - m_x)^2]}, & \text{если } \frac{m_x + S_x^2}{m_x - \underline{x}} < x < \bar{x}; \\ 1, & \text{если } x \geq \bar{x}; \end{cases} \quad (6)$$

$$\underline{F}_x(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq \underline{x}; \\ \frac{1}{[1 + (x - m_x)^2 / S_x^2]}, & \text{если } \underline{x} < x < \frac{m_x + S_x^2}{m_x - \bar{x}}; \\ \frac{1 - (b^2 - ab + c)}{1 - a}, & \text{если } \frac{m_x + S_x^2}{m_x - \bar{x}} < x < \frac{m_x + S_x^2}{m_x - \underline{x}}; \\ 1, & \text{если } x \geq \frac{m_x + S_x^2}{m_x - \underline{x}}, \end{cases} \quad (7)$$

где $x \in [\underline{x}, \bar{x}]$; параметры функций (6), (7) вычисляются следующим образом: $a = (x - \underline{x}) / (\bar{x} - \underline{x})$,

$b = (m_x - \underline{x}) / (\bar{x} - \underline{x})$ и $c = S_x^2 / (\bar{x} - \underline{x})^2$.

Предложена новая конструкция р-блока, хвосты которого описываются выражениями (6), (7), а средняя часть «удаляется» за счет использования свойства медианы генеральной совокупности, которое заключается в том, что медиана является 50-м перцентилем совокупности статистических данных [16].

Табл. 1. Данные испытаний по определению предела текучести стали, МПа

Table 1. Test data for determining the yield strength of steel, MPa

332	336	315	325	327
328	319	330	319	326
331	326	320	327	328

Табл. 2. Статистические характеристики выборки по табл. 1
Table 2. Statistical parameters of the sample by the Table 1

Параметр Parameter	Значение, МПа Value, MPa
Выборочное среднее значение Sample mean	325,93
Выборочное стандартное (среднеквадратическое) отклонение Sample standard deviation	5,62
Доверительный интервал для математического ожидания Confidence interval for mathematical expectation	[322,84; 329,03]
Доверительный интервал для стандартного отклонения Confidence interval for standard deviation	[4,19; 8,87]
Выборочная оценка медианы Sample median	327
Доверительный интервал для медианы Confidence interval for median	[320; 330]

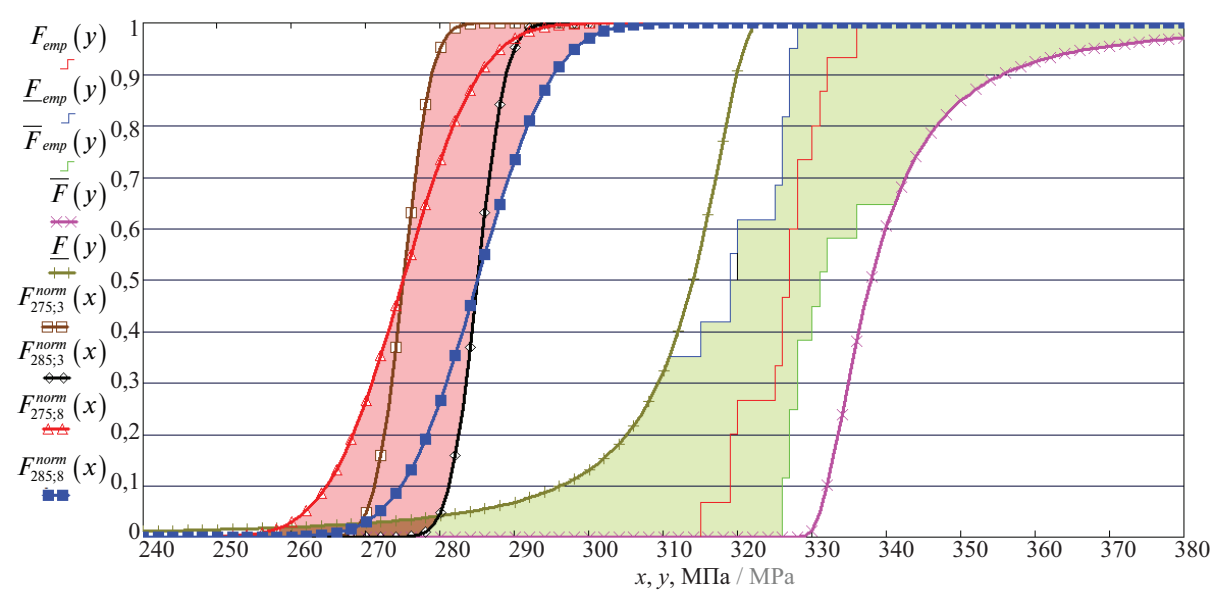


Рис. 2. Граничные функции распределения для напряжения в элементе и предельного напряжения стали
Fig. 2. Boundary cumulative distribution functions for the stress and the ultimate stress of steel

В настоящем исследовании авторы добавили к р-блоку [16] данные о граничных эмпирических функциях распределения на основе неравенства Дворецкого – Кифера – Вулфовица или статистики Колмогорова – Смирнова для уменьшения области неопределенности данных, в то же время не внося статистическую гипотезу о конкретном законе распределения данных, что повышает практическую применимость метода при ограниченной статистической информации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим пример анализа надежности растянутого элемента фермы, например, с расчетной схемой [8], по критерию прочности стали стержня:

σ̃ = Ñ₄₋₆ / A ≤ σ̃_{s,ult}, (8)

где σ̃ — напряжение в стержне от эксплуатационной нагрузки; Ñ₄₋₆ — усилие растяжения в стержне 4–6 фермы; A — площадь поперечного сечения стержня; σ̃_{s,ult} — предельное напряжение стали, принятое равным пределу текучести стали.

Для математической общности расчета перепишем неравенство (8) в виде:

X ≤ Y, (9)

где σ̃ = Ñ₄₋₆ / A = X; σ̃_{s,ult} = Y.

Пусть известны следующие значения выборочной совокупности для прочности стали σ̃_{s,ult} = Y (табл. 1).

Статистические параметры для экспериментальных данных выборочной совокупности по табл. 1 приведены в табл. 2.

Совмещая р-блоки (3) и (6), (7) для случайной величины $\tilde{\sigma}_{s,ult} = Y$, учетом доверительных интервалов для математического ожидания, среднеквадратического отклонения и медианы, можно получить область неопределенности (рис. 2, зеленая заливка), внутри которой располагается действительная функция распределения параметра $\tilde{\sigma}_{s,ult} = Y$.

Напряжение в стержне $\tilde{\sigma} = \tilde{N}_{4-6}/A = X$ также выразим в виде р-блока. Поскольку получить эмпирическую функцию для нагрузки на элемент затруднительно, ее стохастическая модель может быть представлена некоторым распределением с интервальными оценками параметров. Пусть известно, что напряжение в стержне $\tilde{\sigma}$ подчиняется нормальному закону распределения, но параметры нормального распределения заданы в интервальной форме: $m_X \in [275; 285]$ МПа, $S_X \in [3; 8]$ МПа. На основе этих данных можно построить 4 различные нормальные функции распределения, область между которыми является р-блоком (рис. 2, красная заливка). После построения р-блоков для напряжения и предельного напряжения необходимо оценить вероятность безотказной работы стержня. Для этого необходимо выполнить арифметические операции с р-блоками.

В труде [17] приведена информация об основных арифметических операциях с р-блоками (сложение, вычитание, умножение, деление). Математические операции с р-блоками вследствие их различной природы производятся после их трансформации в структуры Демпстера – Шефера [18] путем дискретизации на фокальные элементы.

Распределения при дискретизации ограничиваются 0,5 и 99,5 перцентилями [17]. Шаг дискретизации m_i обычно принимают [17] 0,01 с учетом $\sum_{i=1}^n m_i = 1$.

В данном случае мы получаем 100 интервальных оценок A_i случайной величины X . Следовательно, проводя дискретизацию р-блоков, можно получить 100 интервалов вида $[x_1; \bar{x}_1], [x_2; \bar{x}_2], \dots [x_{100}; \bar{x}_{100}]$.

Аналогично для р-блока случайной величины Y можно выполнить его трансформацию в 100 фокальных элементов: $[y_1; \bar{y}_1], [y_2; \bar{y}_2], \dots [y_{100}; \bar{y}_{100}]$. Функция резерва прочности с двумя моделями

р-блоков (трансформированных в структуры Демпстера – Шефера) будет иметь вид:

$$g = Y - X \leq 0. \tag{10}$$

Функция распределения по модели предельного состояния g будет представлять собой разность двух структур типа Демпстера – Шефера. Для вычисления подмножества значений функции необходимо составить табличную форму (табл. 3). Так как р-блоки Y и X дискретизируются на 100 фокальных элементов, то функция (10) резерва прочности g будет иметь подмножество в 10 000 интервальных значений:

$$g_{i,j} = [g_{i,j}, \bar{g}_{i,j}]. \tag{11}$$

Расчет вероятности безотказной работы P по данным табл. 3 сводится к простому алгоритму: $P \in [\underline{P}, \bar{P}]$, где

$$\begin{aligned} \underline{P} &= \frac{\text{количество} [g_{i,j} < 0]}{10\,000}; \\ \bar{P} &= \frac{\text{количество} [\bar{g}_{i,j} < 0]}{10\,000}. \end{aligned} \tag{12}$$

Для граничных функций распределения по рис. 2 можно получить следующие граничные функции распределения резерва прочности $\underline{F}(g)$ и $\bar{F}(g)$ (рис. 3).

Нижняя граничная функция распределения принимает значение 0,0684 при ординате 0, которая соответствует состоянию отказа. Таким образом, вероятность безотказной работы составит $[0,9316; 1,0000]$. Аналогичное значение получается при использовании формул (12).

Аналитическое решение для нижней границы вероятности безотказной работы в рамках данной задачи может быть найдено через следующую модель:

$$\begin{aligned} \underline{P} &= 1 - \int_{\underline{x}}^{\frac{m_X + S_X^2}{m_X - \bar{x}}} \frac{1}{\left[1 + (x - \bar{m}_Y)^2 / \bar{S}_Y^2\right]} \times \\ &\times \frac{1}{S_X \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(x - \bar{m}_X)^2}{2\bar{S}_X^2}\right). \end{aligned} \tag{13}$$

Табл. 3. Табличная форма для вычисления разности двух р-блоков
Table 3. Tabular form for calculating the subtraction of two p-boxes

–	$[y_1; \bar{y}_1], 0,01$	$[y_2; \bar{y}_2], 0,01$	...	$[y_{100}; \bar{y}_{100}], 0,01$
$[x_1; \bar{x}_1], 0,01$	$g_{1,1} = [y_1 - \bar{x}_1; \bar{y}_1 - x_1], 0,0001$	$g_{2,1} = [y_2 - \bar{x}_1; \bar{y}_2 - x_1], 0,0001$	...	$g_{100,1} = [y_{100} - \bar{x}_1; \bar{y}_{100} - x_1], 0,0001$
$[x_2; \bar{x}_2], 0,01$	$[y_1 - \bar{x}_2; \bar{y}_1 - x_2], 0,0001$	$[y_2 - \bar{x}_2; \bar{y}_2 - x_2], 0,0001$	...	$[y_{100} - \bar{x}_2; \bar{y}_{100} - x_2], 0,0001$
....	...	...	...	...
$[x_{100}; \bar{x}_{100}], 0,01$	$[y_1 - \bar{x}_{100}; \bar{y}_1 - x_{100}], 0,0001$	$[y_2 - \bar{x}_{100}; \bar{y}_2 - x_{100}], 0,0001$	...	$[y_{100} - \bar{x}_{100}; \bar{y}_{100} - x_{100}], 0,0001$

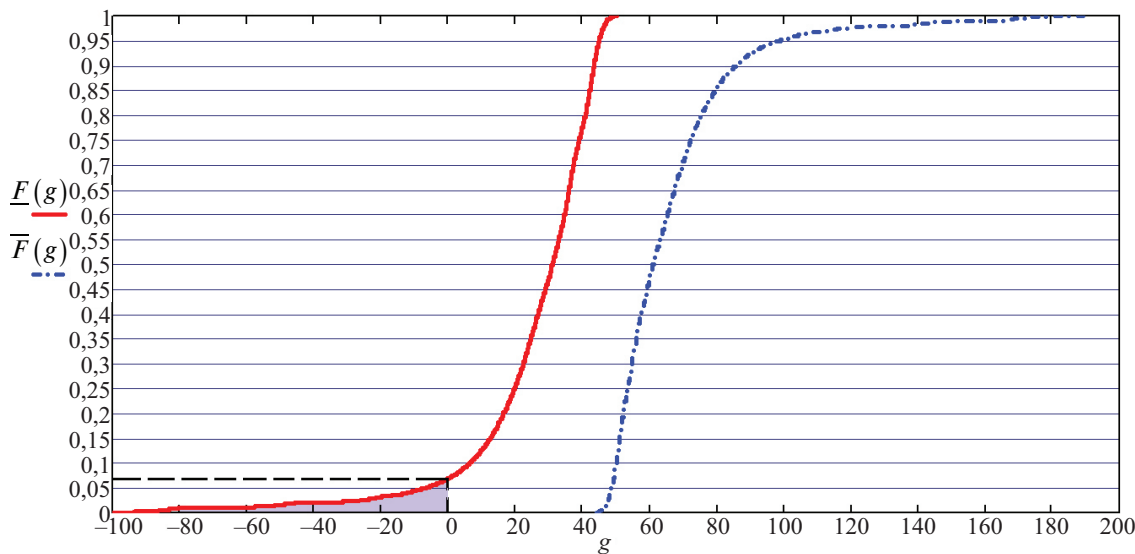


Рис. 3. Граничные функции распределения резерва прочности $\underline{F}(g)$ и $\bar{F}(g)$

Fig. 3. Boundary distribution functions $\underline{F}(g)$ and $\bar{F}(g)$ for strength reserve

Нижняя граница вероятности безотказной работы по выражению (13) составит $[0,9403; 1,0000]$. Разница между аналитическим и численным решением составляет 0,9 %. Отклонения вызваны уровнем дискретизации р-блока (100 фокальных элементов) и ограничением 0,5 и 99,5 перцентилями. Использование метода анализа надежности путем дискретизации р-блоков в структуры Демпстера – Шефера расширяет интервал надежности вследствие увеличения области эпистемологической неопределенности.

Вместо данных перцентилей также могут быть использованы границы изменчивости случайных величин, полученные на основе неравенства Высочанского – Петунина.

Тем не менее при работе с большим количеством р-блоков аналитическое решение крайне трудно или невозможно, а описанный численный метод дискретизации р-блоков позволяет оперативно решить данные задачи. Алгоритмы, подобные

табл. 3, легко автоматизируются в различных математических комплексах, что позволяет оперативно выполнять расчет надежности с применением р-блоков для более сложных нелинейных математических моделей предельных состояний.

Использование граничных функций распределения вероятностей (6), (7) даст возможность формировать достоверные интервалы при малых выборках, однако с ростом статистической информации область неопределенности между двумя граничными функциями может оставаться довольно широкой. В этом случае могут быть использованы граничные функции распределения для описания «хвостов» р-блока без привязки к доверительной оценке математического ожидания и среднеквадратического отклонения.

В таком случае «хвосты» р-блока предлагается описывать нечеткими функциями распределения с аналитическим видом:

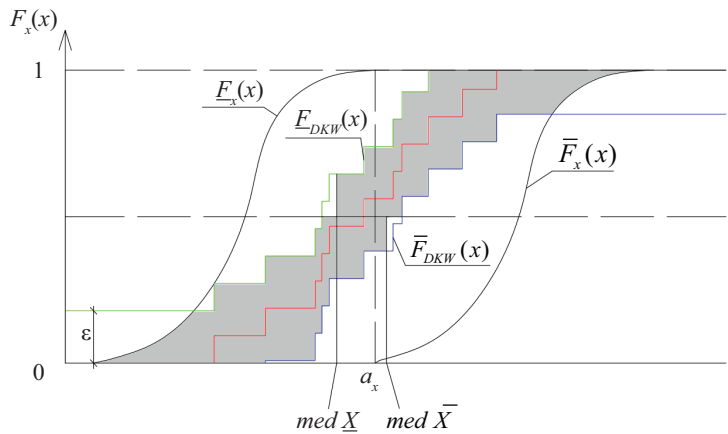


Рис. 4. Граничные функции распределения с использованием нечетких функций распределения

Fig. 4. Boundary distribution functions based on fuzzy distribution functions

$$\underline{F}_x(x) = \begin{cases} \exp \left[- \left(\frac{a_x - x}{b_x} \right)^2 \right], & \text{если } x < a_x; \\ 1, & \text{если } x \geq a_x; \end{cases} \quad (14)$$

$$\overline{F}_x(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < a_x; \\ 1 - \exp \left[- \left(\frac{a_x - x}{b_x} \right)^2 \right], & \text{если } x \geq a_x, \end{cases} \quad (15)$$

где $a_x = 0,5 \cdot (X_{\max} + X_{\min})$ — условное «среднее»; $b_x = 0,5(X_{\max} - X_{\min})/\sqrt{-\ln \alpha}$ — мера «рассеяния», где $X_{\max}$ и $X_{\min}$ — наибольшее и наименьшее значения во множестве значений $\{x\}$, полученных из результатов измерений (испытаний); $\alpha \in [0; 1]$ — уровень среза (риска), значение которого задается таким образом, чтобы функции F_{DKW} и $F_x(x)$ пересекались в крайней точке «скачка» (см. рис. 4).

Преимуществом такой модели случайной величины является улучшенная сходимость с ростом числа статистической выборки данных.

Существует еще один вариант численного решения задачи анализа надежности с использованием р-блоков — метод интервального сэмпирования данных по типу Монте-Карло [19]. Он может быть рекомендован для параллельной оценки надежности с использованием метода дискретизации или аналитического метода, так как методы генерации данных по типу Монте-Карло могут завышать оцен-

ку надежности при малой вероятности отказа, что зачастую встречается в инженерно-строительной практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вероятность безотказной работы $[0,9403; 1,0000]$ в примере не говорит о низкой надежности элемента, а отражает широкий интервал неопределенности вследствие недостатка статистической информации. С практической точки зрения может быть принято два решения: увеличить сечение элемента при имеющихся статистических данных, чтобы нижняя граница вероятности безотказной работы была близка к заданному уровню надежности [20, 21], или уменьшить неопределенность данных путем проведения дополнительных испытаний/измерений статистических данных случайных величин, что позволит сократить область р-блока и получить более узкие границы вероятности безотказной работы. Выбор решения будет зависеть от технико-экономического сравнения указанных вариантов.

Представленный в статье подход к анализу надежности обладает высоким уровнем практической значимости, поскольку в задачах оценки вероятности безотказной работы существующих конструкций отпадает необходимость принятия решений о конкретном виде распределения случайной величины или назначения точных параметров. В то же время имеются и другие конструкции р-блоков [14–16], которые могут быть использованы в рассмотренном алгоритме и могут быть более подходящими для конкретной задачи анализа надежности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мкртычев О.В., Щедрин О.С., Лохова Е.М. Определение коэффициентов надежности по ответственности для отдельных несущих элементов на основе вероятностного анализа // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 10. С. 1331–1346. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1331-1346
2. Raizer V., Elishakoff I. Philosophies of structural safety and reliability. Boca Raton : CRC Press, 2022. 268 p. DOI: 10.1201/9781003265993
3. Zhang X., Wu Z., Ma H., Pandey M.D. An effective Kriging-based approximation for structural reliability analysis with random and interval variables // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2021. Vol. 63. Issue 5. Pp. 2473–2491. DOI: 10.1007/s00158-020-02825-8
4. Xu J., Wang D. Structural reliability analysis based on polynomial chaos, Voronoi cells and dimension reduction technique // Reliability Engineering & System Safety. 2019. Vol. 185. Pp. 329–340. DOI: 10.1016/j.res.2019.01.001
5. Kabir S., Papadopoulos Y. Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments : a review // Safety science. 2019. Vol. 115. Pp. 154–175. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.02.009
6. Elishakoff I., Daphnis A. Simple application of interval analyses to structural safety: standard versus parameterised versions // International Journal of Sustainable Materials and Structural Systems. 2018. Vol. 3. Issue 3–4. Pp. 203–217. DOI: 10.1504/IJSMSS.2018.10024424
7. Zhou S., Zhang J., You L., Zhang Q. Uncertainty propagation in structural reliability with implicit limit state functions under aleatory and epistemic uncertainties // Eksploatacja i Niezawodność, 2021. Vol. 23. Issue 2. Pp. 231–241. DOI: 10.17531/ein.2021.2.3
8. Soloveva A.A., Solovev S.A. Reliability analysis of RHS steel trusses joints based on the p-boxes approach // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. Issue 1. Pp. 87–97. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-1-87-97

9. *Faes M., Daub M., Beer M.* Engineering analysis with imprecise probabilities: a state-of-the-art review on P-boxes // *Proceedings of the 7th Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications*. University of Tokyo, 2020. Pp. 1–6. URL: <https://lirias.kuleuven.be/3217103>

10. *Xie H., Li J., Liao D.* A new structural reliability analysis method under non-parameterized probability box variables // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2022. Vol. 65. Issue 11. Pp. 1–10. DOI: 10.1007/s00158-022-03408-5

11. *Dvoretzky A., Kiefer J., Wolfowitz J.* Asymptotic minimax character of the sample distribution function and of the classical multinomial estimator // *The Annals of Mathematical Statistics*. 1956. Vol. 27. Issue 3. Pp. 642–669. DOI:10.1214/aoms/1177728174

12. *Massart P.* The tight constant in the Dvoretzky – Kiefer – Wolfowitz inequality // *Annals of Probability*. 1990. Vol. 18. Issue 3. Pp. 1269–1283. DOI:10.1214/aop/1176990746

13. *Kovalev M.S., Utkin L.V.* A robust algorithm for explaining unreliable machine learning survival models using the Kolmogorov – Smirnov bounds // *Neural Networks*. 2020. Vol. 132. Pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.neunet.2020.08.007

14. *Ferson S., Gray A.* Distribution-free uncertainty propagation // *Proceedings of the 9th International Workshop on Reliable Engineering Computing REC'2021*, Taormina, Italy. 2021. Pp. 395–407. URL: https://livrepository.liverpool.ac.uk/3124146/1/REC2021_37_Gray.pdf

15. *Oberguggenberger M., Fellin W.* Reliability bounds through random sets: Non-parametric methods and geotechnical applications // *Computers & Structures*. 2008. Vol. 86. Issue 10. Pp. 1093–1101. DOI: 10.1016/j.compstruc.2007.05.040

16. *Соловьева А.А., Соловьев С.А.* Разработка уточненного р-блока как модели случайной величины в задачах анализа надежности строительных конструкций // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2022. № 1 (300). С. 20–28. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.1.20.28

17. *Karanki D.R., Kushwaha H.S., Verma A.K., Ajit S.* Uncertainty analysis based on probability bounds (p-box) approach in probabilistic safety assessment // *Risk Analysis : an International Journal*. 2009. Vol. 29. Issue 5. Pp. 662–675. DOI: 10.1111/j.1539-6924.2009.01221.x

18. *Zhang Z., Jiang C., Han X., Hu D., Yu S.* A response surface approach for structural reliability analysis using evidence theory // *Advances in Engineering Software*. 2014. Vol. 69. Pp. 37–45. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.005

19. *Zhang H., Mullen R.L., Muhanna R.L.* Interval Monte Carlo methods for structural reliability // *Structural Safety*. 2010. Vol. 32. Issue 3. Pp. 183–190. DOI: 10.1016/j.strusafe.2010.01.001

20. *Sykora M., Diamantidis D., Holicky M., Jung K.* Target reliability for existing structures considering economic and societal aspects // *Structure and Infrastructure Engineering*. 2017. Vol. 13. Issue 1. Pp. 181–194. DOI: 10.1080/15732479.2016.1198394

21. *Bhattacharya B., Basu R., Ma K.* Developing target reliability for novel structures: the case of the Mobile Offshore Base // *Marine structures*. 2001. Vol. 14. Issue 1–2. Pp. 37–58. DOI: 10.1016/S0951-8339(00)00024-1

Поступила в редакцию 29 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 11 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 13 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Александрович Соловьев** — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 821778, Scopus: 57215081781, ResearcherID: AAJ-1708-2020; solovevsa@vogu35.ru;

Анастасия Андреевна Соловьева — аспирант, преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 1090512, Scopus: 57223210877, ResearcherID: ABG-1982-2021; solovevaaa@vogu35.ru.

Вклад авторов:

Соловьев С.А. — научное руководство, анализ результатов исследования.

Соловьева А.А. — научный обзор, реализация численных расчетов, написание исходного текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. *Mkrtychev O.V., Shchedrin O.S., Lokhova E.M.* Determination of individual coefficients

on the basis of probabilistic analysis. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture

ture]. 2022; 17(10):1331-1346. DOI:10.22227/1997-0935.2022.10.1331-1346 (rus.).

2. Raizer V., Elishakoff I. *Philosophies of Structural Safety and Reliability*. Boca Raton, CRC Press, 2022; 268. DOI: 10.1201/9781003265993

3. Zhang X., Wu Z., Ma H., Pandey M.D. An effective Kriging-based approximation for structural reliability analysis with random and interval variables. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2021; 63(5):2473-2491. DOI: 10.1007/s00158-020-02825-8

4. Xu J., Wang D. Structural reliability analysis based on polynomial chaos, Voronoi cells and dimension reduction technique. *Reliability Engineering & System Safety*. 2019; 185:329-340. DOI: 10.1016/j.res.2019.01.001

5. Kabir S., Papadopoulos Y. Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments : a review. *Safety Science*. 2019; 115:154-175. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.02.009

6. Elishakoff I., Daphnis A. Simple application of interval analyses to structural safety: standard versus parameterised versions. *International Journal of Sustainable Materials and Structural Systems*. 2018; 3(3-4):203-217. DOI: 10.1504/IJSMSS.2018.10024424

7. Zhou S., Zhang J., You L., Zhang Q. Uncertainty propagation in structural reliability with implicit limit state functions under aleatory and epistemic uncertainties. *Eksplotacja i Niezawodność*. 2021; 23(2):231-241. DOI: 10.17531/ein.2021.2.3

8. Soloveva A.A., Solovev S.A. Reliability analysis of RHS steel trusses joints based on the p-boxes approach. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17(1):87-97. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-1-87-97

9. Faes M., Daub M., Beer M. Engineering analysis with imprecise probabilities: a state-of-the-art review on P-boxes. *Proceedings of the 7th Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications*. University of Tokyo; 2020:1-6. URL: <https://lirias.kuleuven.be/3217103>

10. Xie H., Li J., Liao D. A new structural reliability analysis method under non-parameterized probability box variables. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2022; 65(11):1-10. DOI: 10.1007/s00158-022-03408-5

11. Dvoretzky A., Kiefer J., Wolfowitz J. Asymptotic minimax character of the sample distribution function and of the classical multinomial estimator. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1956; 27(3):642-669. DOI:10.1214/aoms/1177728174

12. Massart P. The tight constant in the Dvoretzky – Kiefer – Wolfowitz inequality. *Annals of Probability*. 1990; 18(3):1269-1283. DOI: 10.1214/aop/1176990746

13. Kovalev M.S., Utkin L.V. A robust algorithm for explaining unreliable machine learning survival models using the Kolmogorov – Smirnov bounds. *Neural Networks*. 2020; 132:1-18. DOI: 10.1016/j.neunet.2020.08.007

14. Ferson S., Gray A. Distribution-free uncertainty propagation. *Proceedings of the 9th International Workshop on Reliable Engineering Computing REC'2021, Taormina, Italy*. 2021:395-407. URL: https://livrepository.liverpool.ac.uk/3124146/1/REC2021_37_Gray.pdf

15. Oberguggenberger M., Fellin W. Reliability bounds through random sets: Non-parametric methods and geotechnical applications. *Computers & Structures*. 2008; 86(10):1093-1101. DOI: 10.1016/j.compstruc.2007.05.040

16. Soloveva A.A., Solovev S.A. Development of a refined p-box as a random variable model in problems of structural reliability analysis. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij* [Structural Mechanics and Analysis of Constructions]. 2022; 1(300):20-28. DOI 10.37538/0039-2383.2022.1.20.28.

17. Karanki D.R., Kushwaha H.S., Verma A.K., Ajit S. Uncertainty analysis based on probability bounds (p-box) approach in probabilistic safety assessment. *Risk Analysis : an International Journal*. 2009; 29(5):662-675. DOI: 10.1111/j.1539-6924.2009.01221.x

18. Zhang Z., Jiang C., Han X., Hu D., Yu S. A response surface approach for structural reliability analysis using evidence theory. *Advances in Engineering Software*. 2014; 69:37-45. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.005

19. Zhang H., Mullen R.L., Muhanna R.L. Interval Monte Carlo methods for structural reliability. *Structural Safety*. 2010; 32(3):183-190. DOI: 10.1016/j.strusafe.2010.01.001

20. Sykora M., Diamantidis D., Holicky M., Jung K. Target reliability for existing structures considering economic and societal aspects. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2017; 13(1):181-194. DOI: 10.1080/15732479.2016.1198394

21. Bhattacharya B., Basu R., Ma K. Developing target reliability for novel structures: the case of the mobile offshore base. *Marine Structures*. 2001; 14(1-2):37-58. DOI: 10.1016/S0951-8339(00)00024-1

Received August 29, 2023.

Adopted in revised form on September 11, 2023.

Approved for publication on September 13, 2023.

BIONOTES: **Sergey A. Solovev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenina st., Vologda, 160000, Russian Federation; ID RSCI: 821778, Scopus: 57215081781, ResearcherID: AAJ-1708-2020; solovevsa@vogu35.ru;

Anastasia A. Soloveva — postgraduate student, lecturer of the Department of Industrial and Civil Engineering; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenina st., Vologda, 160000, Russian Federation; ID RSCI: 1090512; Scopus: 57223210877, ResearcherID: ABG-1982-2021; solovevaaa@vogu35.ru.

Contribution of the authors:

Sergey A. Solovev — supervision, analysis of the results.

Anastasia A. Soloveva — conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text.

The authors declare no conflicts of interest.

Влияние податливости внутримодульных узлов на частоту собственных колебаний модульного здания

Вячеслав Сергеевич Широков

Самарский государственный технический университет (СамГТУ); г. Самара, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Внедрение модульных зданий приводит к необходимости развития методов их расчета, в том числе на динамические воздействия. Одним из основных параметров при вычислении нагрузок от динамических воздействий является установление частот собственных колебаний сооружения. Предмет исследования — собственная частота колебаний модульных зданий. Цель исследования — определение влияния податливости внутримодульных узлов на частоты колебаний модульных зданий.

Материалы и методы. Рассматривается вопрос выявления первой собственной частоты колебаний модульного здания с полужесткими внутримодульными узлами и влияния податливости узлов на частоту. Предложена и обоснована аналитическая формула определения собственных частот колебаний, учитывающая жесткостные параметры модульных зданий и податливость внутримодульных узлов. Предложенная формула имеет достаточную точность для инженерных расчетов. При этом она позволяет анализировать частоты колебаний модульных зданий с разными параметрами без построения расчетных схем в вычислительных комплексах, что значительно ускоряет поиск рациональных конструктивных решений.

Результаты. Согласно полученным результатам, расхождение в значениях частот, вычисленных по методу конечных элементов и аналитически, для одноэтажного здания при разных соотношениях вращательных жесткостей узлов не превышает 1,5 %. При рассмотрении многоэтажного модульного здания разность определения собственных частот колебания возрастает с увеличением числа этажей, но не превышает 10 % для трех этажей.

Выводы. На основе рассмотрения примера модульного здания показано, что необходимо учитывать податливость узлов для установления корректного значения собственных частот колебаний. Неучет вращательной жесткости узлов может привести к погрешности определения динамических воздействий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: модульные здания, собственная частота колебаний, динамические воздействия, податливые узлы, рамные узлы, вращательная жесткость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Широков В.С. Влияние податливости внутримодульных узлов на частоту собственных колебаний модульного здания // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 10. С. 1556–1562. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1556-1562

Автор, ответственный за переписку: Вячеслав Сергеевич Широков, ShirokovViacheslav@gmail.com.

Influence of compliance of intramodular joints on the natural vibrations frequency of a modular building

Viacheslav S. Shirokov

Samara State Technical University (SSTU); Samara, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The implementation of modular buildings leads to the necessity to develop methods of their calculation, including dynamic loads too. One of the main parameters in the calculation of loads from dynamic effects is the determination of natural frequencies of vibrations of the structure. The subject of research is the natural vibrational frequency of modular buildings. The aim of the research is to determine the effect of the compliance of intramodular joints on the vibrational frequencies of modular buildings.

Materials and methods. The paper deals with the determination of the first natural frequency of vibration of a modular building with semi-rigid intramodular joints, and the influence of the compliance of the joints on the frequency. The author of the paper proposed and substantiated an analytical formula for determining the natural vibration frequencies, taking into account the stiffness parameters of modular buildings and the rigidity of intramodular joints. The proposed formula has sufficient accuracy for engineering calculations. At the same time, it allows to analyze the natural vibrational frequencies of modular buildings with different parameters without constructing calculation schemes in computer systems, which significantly speeds up the search for rational design solutions.

Results. According to the obtained results, the discrepancy in the frequency values calculated by the finite element method and analytically for a one-storey building with different ratios of the rotational stiffness of the joints does not exceed 1.5 %. For a multi-storey modular building, the difference in determining the natural vibration frequencies increases with the number of storeys, but does not exceed 10 % for three storeys.

Conclusions. Based on the example of a modular building, it is shown that it is necessary to take into account the joint rigidity to determine the correct value of natural vibrational frequencies. Ignoring of the rotational stiffness of the joints can lead to an error in determining the dynamic effects.

KEYWORDS: modular buildings, natural vibration frequency, dynamic loads, semi-rigid joints, rigid joints, rotational stiffness**FOR CITATION:** Shirokov V.S. Influence of compliance of intramodular joints on the natural vibrations frequency of a modular building. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(10):1556-1562. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1556-1562 (rus.).

Corresponding author: Viacheslav S. Shirokov, ShirokovViacheslav@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие в практике строительства активно внедряются и применяются модульные здания. Модульное здание представляет собой сооружение из набора связанных между собой модулей. Модуль — законченный пространственный строительный элемент здания, выполняющий несущие, ограждающие и функциональные требования.

Модульные здания классифицируются по материалу несущих конструкций, конструктивной схеме, исполнению каркаса модулей и узловым соединениям [1]. В настоящем исследовании рассматриваются модульные здания из стальных составленных модулей с несущими угловыми колоннами.

Внедрение модульных зданий приводит к необходимости развития методов их расчета. При этом особого внимания заслуживает работа здания при динамических воздействиях (сейсмика, пульсация ветра). Важнейший параметр при вычислении нагрузок от динамических воздействий — определение собственных частот колебаний сооружения. Этим вопросом занимается ряд авторов [2–8]. В статье [4] приводится обобщение существующих результатов установления частот колебаний разных модульных зданий из упомянутых публикаций. Результаты сравниваются с приближенными формулами, указанными в австралийских нормах проектирования. Согласно сравнению, только для определенных частных случаев можно использовать приближенную формулу установления частоты колебаний.

В труде [9] получена формула определения собственных частот колебаний модульного здания с рамными внутримодульными соединениями, учитывающая жесткостные параметры модулей. В работах [10, 11] показано, что соединения ригелей модулей с колоннами на сварке не всегда рамные, существует множество конструктивных решений, при которых эти узлы являются полужесткими (податливыми). Также в настоящее время многие авторы проводят исследования влияния жесткости узлов на работу стальных конструкций [12–19]. Уточнение расчетов, в том числе определение частот колебаний, с учетом податливости узлов — актуальное направление исследований.

Цель данной работы — определение первой собственной частоты колебаний модульного здания с полужесткими внутримодульными узлами и оценка влияния податливости узлов на частоту.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для выявления частоты колебаний модуля необходимо определить коэффициент жесткости одной рамы [9], который вычисляется с помощью горизонтальных перемещений от единичной нагрузки (рис. 1). Суммарное перемещение складывается из упругой деформации, обусловленной жесткостью самой рамы и дополнительными перемещениями от податливости узлов:

$$\Delta = \Delta_E + \Delta_{S1} + \Delta_{S2}, \quad (1)$$

где Δ_E — упругое перемещение; Δ_{S1} , Δ_{S2} — дополнительные перемещения, вызванные податливостью узлов крепления нижнего и верхнего ригелей, соответственно.

Упругое перемещение согласно публикации [9]:

$$\Delta_E = \frac{P \cdot h^3}{24 \cdot E \cdot I_1} \left(1 + \frac{I_1 \cdot l_2}{I_2 \cdot h} \right), \quad (2)$$

где P — единичная горизонтальная нагрузка, приложенная в верхнем узле рамы; h — высота модуля; E — модуль упругости; I_1 , I_2 — моменты инерции стойки и ригеля соответственно; l_2 — пролет ригеля.

Так как узлы обладают конечной жесткостью, то при деформации рамы угол между ригелем и стойкой не сохраняется прямым. Изменение угла, вызванное податливостью крепления, для нижнего узла — φ_1 , для верхнего — φ_2 (рис. 2). В силу симметричности деформации и эпюры изгибающих моментов от единичной горизонтальной нагрузки для определения линейных деформаций для каждого узла рассматривается половина рамы. Тогда дополнительные перемещения от податливости узлов:

$$\Delta_{S1} = \tan(\varphi_1) \frac{h}{2}; \quad (3)$$

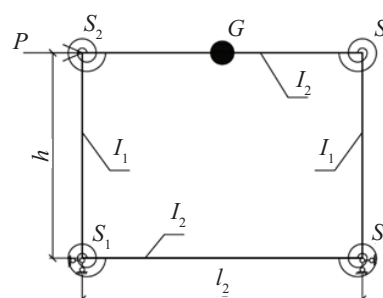


Рис. 1. Расчетная схема рамы

Fig. 1. Frame design scheme

$$\Delta_{S2} = \tan(\varphi_2) \frac{h}{2}. \tag{4}$$

Углы деформаций связаны с вращательной жесткостью узла следующими выражениями:

$$\varphi_1 = \frac{M}{S_1}; \tag{5}$$

$$\varphi_2 = \frac{M}{S_2}, \tag{6}$$

где S_1, S_2 — вращательные жесткости нижнего и верхнего узлов соответственно; M — момент в узле от единичной нагрузки:

$$M = \frac{P \cdot h}{4}. \tag{7}$$

Подставляя выражения (5) и (6) в (3) и (4) соответственно, с учетом выражения (7) и малости углов получим:

$$\Delta_{S1} = \frac{P \cdot h^2}{8 \cdot S_1}; \tag{8}$$

$$\Delta_{S2} = \frac{P \cdot h^2}{8 \cdot S_2}. \tag{9}$$

В итоге суммарное перемещение от единичной нагрузки:

$$\Delta = \frac{P \cdot h^2}{8} \left(\frac{h}{3 \cdot E \cdot I_1} + \frac{l_2}{3 \cdot E \cdot I_1} + \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} \right). \tag{10}$$

Первая собственная частота колебаний:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \times \sqrt{\frac{8 \cdot g}{c^2 \cdot G \cdot h^2 \cdot \left(\frac{h}{3 \cdot E \cdot I_1} + \frac{l_2}{3 \cdot E \cdot I_1} + \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} \right)}}, \tag{11}$$

где g — ускорение свободного падения; c — количество этажей здания; G — масса, собранная на одну раму.

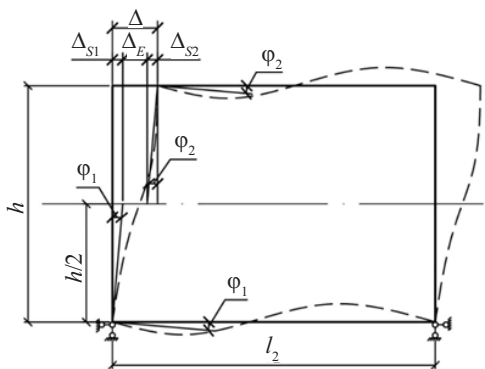


Рис. 2. Схема рамы к определению горизонтальных перемещений

Fig. 2. Frame scheme for displacement definition

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для апробации полученной формулы определения первой собственной частоты колебаний рассмотрено модульное здание с сечениями, принятыми из работы [20]: $I_1 = 561,8 \text{ см}^4, I_2 = 1148,38 \text{ см}^4$. Размеры модуля приняты $2,8 \times 6,6 \times 3(h)$ м. Вертикальная нагрузка на перекрытия (нижнее и верхнее) $p = 120 \text{ кг/м}^2$.

Оценка точности установления частоты колебаний при разных значениях вращательных жесткостей нижнего и верхнего узлов выполнена для одноэтажного здания. Данную оценку удобно производить через соотношение вращательных жесткостей:

$$k_s = \frac{S_2}{S_1}. \tag{12}$$

Результаты определения первой собственной частоты методом конечных элементов (МКЭ) и по формуле (11) представлены в табл. 1. В табл. 1 знак ∞ соответствует рамным узлам. Согласно полученным результатам, разность определения собственной частоты колебания одноэтажного модульного здания по формуле (11) и по МКЭ не превышает 1,5 %.

Влияние податливости узлов на частоты колебаний модульного здания установлено при равных вращательных жесткостях узлов для одно-, двух- и трехэтажного здания с параметрами модуля, принятыми выше.

Согласно результатам, представленным в табл. 2, расхождение в значениях частот, вычисленных по МКЭ и аналитически, возрастает с увеличением числа этажей, но не превышает 10 % для трехэтажного здания. Таким образом, предложенная формула имеет достаточную точность для инженерных расчетов. При этом она позволяет анализировать частоты колебаний модульных зданий с разными параметрами без построения расчетных схем в вычислительных комплексах, что значительно ускоряет поиск рациональных конструктивных решений.

В рассмотренном примере разность собственных частот колебаний здания с рамными и податливыми узлами достигает 20 %. Неучет вращательной жесткости узлов может привести к погрешности определения динамических воздействий. При расчете модуля с рамными узлами частота колебаний увеличивается, следовательно, уменьшается коэффициент динамичности ветровой нагрузки, а коэффициент динамичности сейсмического воздействия может уменьшиться.

Результаты определения частот собственных колебаний модульного здания с разным количеством этажей приведены на рис. 3. На графике сплошными линиями показано изменение частоты, вычисленной в ПК Лира-САПР, штрихпунктирными — по формуле (11). Для одноэтажного здания частоты, вычисленные аналитически и по МКЭ, практически совпадают. Штриховой линией на рис. 3 показано значение частоты колебаний здания с рамными узлами, опре-

Табл. 1. Результаты вычисления частот колебаний при разных соотношениях жесткостей узлов
Table 1. Results of vibrational frequencies calculation for different joint stiffness ratio

S_1 , кНм/рад kNm/rad	Метод Method	Соотношение k_s / k_s ratio					
		1	2	4	8	16	∞
2000	МКЭ / FEM	2,673	2,809	2,892	2,938	2,963	2,989
	Формула (11) / Formula (11)	2,670	2,798	2,87	2,907	2,927	2,947
4000	МКЭ / FEM	2,948	3,034	3,082	3,108	3,121	3,135
	Формула (11) / Formula (11)	2,947	3,031	3,075	3,098	3,110	3,122
6000	МКЭ / FEM	3,061	3,123	3,157	3,175	3,184	3,193
	Формула (11) / Formula (11)	3,060	3,122	3,154	3,171	3,179	3,187
8000	МКЭ / FEM	3,122	3,171	3,197	3,211	3,218	3,225
	Формула (11) / Formula (11)	3,122	3,171	3,196	3,209	3,215	3,222
10 000	МКЭ / FEM	3,161	3,201	3,222	3,233	3,239	3,244
	Формула (11) / Formula (11)	3,161	3,201	3,222	3,232	3,238	3,243
12 000	МКЭ / FEM	3,187	3,221	3,239	3,248	3,253	3,258
	Формула (11) / Formula (11)	3,187	3,222	3,240	3,248	3,253	3,257
14 000	МКЭ / FEM	3,206	3,226	3,242	3,250	3,254	3,258
	Формула (11) / Formula (11)	3,207	3,237	3,252	3,260	3,264	3,268
16 000	МКЭ / FEM	3,221	3,230	3,244	3,251	3,254	3,258
	Формула (11) / Formula (11)	3,222	3,248	3,262	3,269	3,272	3,276
18 000	МКЭ / FEM	3,233	3,256	3,269	3,275	3,278	3,281
	Формула (11) / Formula (11)	3,234	3,257	3,270	3,276	3,279	3,282
20 000	МКЭ / FEM	3,242	3,263	3,274	3,280	3,283	3,286
	Формула (11) / Formula (11)	3,243	3,265	3,276	3,281	3,284	3,287
22 000	МКЭ / FEM	3,250	3,269	3,279	3,284	3,287	3,290
	Формула (11) / Formula (11)	3,251	3,271	3,281	3,286	3,288	3,291
24 000	МКЭ / FEM	3,256	3,274	3,283	3,288	3,290	3,293
	Формула (11) / Formula (11)	3,257	3,276	3,285	3,290	3,292	3,294
26 000	МКЭ / FEM	3,262	3,278	3,287	3,291	3,293	3,296
	Формула (11) / Formula (11)	3,263	3,280	3,288	3,293	3,295	3,297
28 000	МКЭ / FEM	3,266	3,282	3,290	3,294	3,296	3,298
	Формула (11) / Formula (11)	3,268	3,284	3,292	3,296	3,298	3,300
30 000	МКЭ / FEM	3,271	3,285	3,293	3,296	3,298	3,300
	Формула (11) / Formula (11)	3,272	3,287	3,294	3,298	3,300	3,302
∞	МКЭ / FEM	3,330	3,330	3,330	3,330	3,330	3,330
	Формула (11) / Formula (11)	3,332	3,332	3,332	3,332	3,332	3,332

деленное по МКЭ. Вертикальные линии на графике: значение вращательной жесткости узлов, определенное авторами [20] ($S_{j,ini} = 2235$ кНм/рад), и значение вращательной жесткости, при которой внутримодульные узлы можно классифицировать как рамные согласно Eurocode 3 ($S_{j,ini} = 24\,293$ кНм/рад).
Как следует из графика (рис. 3), частота колебаний зданий имеет нелинейную зависимость от вращательной жесткости внутримодульных узлов. При низких значениях вращательных жесткостей наблюдается значительное расхождение частот по сравнению с рамными узлами. На примере рассмотренного здания ($S_{j,ini} = 2235$ кНм/рад) видно, что необходимо учитывать податливость узлов для

определения корректного значения собственных частот колебаний. При значениях вращательных жесткостей узлов, близких к рамным узлам по классификации Eurocode 3, частоты колебаний здания с учетом податливости достаточно близки к частотам здания с рамными узлами.
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ
На основе выполненной работы можно сделать следующие выводы.
Уточнение расчетов модульных зданий, в том числе установление собственных частот колебаний, с учетом податливости узлов является актуальным направлением исследований в настоящее время.

Табл. 2. Результаты вычисления частот колебаний для модульных зданий с разным количеством этажей

Table 2. Results of vibrational frequencies calculation for different numbers of storeys

$S_1 = S_2, \text{ кНм/рад}$ kNm/rad	МКЭ / FEM			Формула (11) / Formula (11)			Разность, % / Discrepancy, %		
	1-этажное 1-storey	2-этажное 2-storey	3-этажное 3-storey	1-этажное 1-storey	2-этажное 2-storey	3-этажное	1-этажное 1-storey	2-этажное 2-storey	3-этажное 3-storey
2000	2,673	1,449	0,980	2,670	1,335	0,890	0,11	7,87	9,18
4000	2,948	1,600	1,082	2,947	1,473	0,982	0,03	7,94	9,24
6000	3,061	1,662	1,124	3,060	1,530	1,020	0,03	7,94	9,25
8000	3,122	1,695	1,147	3,122	1,561	1,041	0	7,91	9,24
10 000	3,161	1,716	1,161	3,161	1,580	1,054	0	7,93	9,22
12 000	3,187	1,731	1,171	3,187	1,594	1,062	0	7,91	9,31
14 000	3,206	1,742	1,178	3,207	1,603	1,069	-0,03	7,98	9,25
16 000	3,221	1,750	1,184	3,222	1,611	1,074	-0,03	7,94	9,29
18 000	3,233	1,756	1,188	3,234	1,617	1,078	-0,03	7,92	9,26
20 000	3,242	1,761	1,192	3,243	1,622	1,081	-0,03	7,89	9,31
22 000	3,250	1,766	1,195	3,251	1,625	1,084	-0,03	7,98	9,29
24 000	3,256	1,769	1,197	3,257	1,629	1,086	-0,03	7,91	9,27
26 000	3,262	1,772	1,199	3,263	1,632	1,088	-0,03	7,9	9,26
28 000	3,266	1,775	1,201	3,268	1,634	1,089	-0,06	7,94	9,33
30 000	3,271	1,777	1,202	3,272	1,636	1,091	-0,03	7,93	9,23
∞	3,330	1,810	1,225	3,332	1,666	1,111	-0,06	7,96	9,31

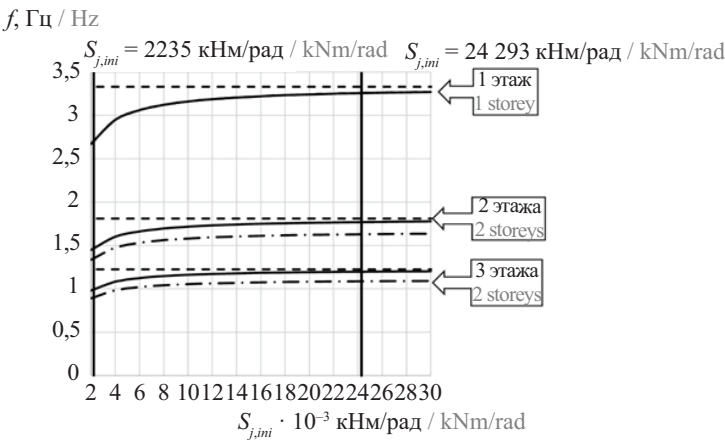


Рис. 3. Изменение первой частоты собственных колебаний модульного здания различной этажности

Fig. 3. First mode natural vibrational frequency changing for different numbers of storeys

Автором работы предложена и обоснована аналитическая формула определения собственных частот колебаний, учитывающая жесткостные параметры модульных зданий и податливость внутримодульных узлов. Предложенная формула имеет достаточную точность для инженерных расчетов. При этом она позволяет анализировать частоты колебаний модульных зданий с разными параметрами без построения расчетных схем в вычислительных комплексах, что значительно ускоряет поиск рациональных конструктивных решений.

Жесткость внутримодульных узлов может оказывать существенное влияние на собственные частоты

колебаний, что было продемонстрировано на примере рассмотренного модульного здания.

В рамках данного исследования показано, что податливость узлов соединения ригеля и стойки модульных зданий влияет на их напряженно-деформированное состояние. Предложенная аналитическая формула имеет хорошую сходимость с методом конечных элементов. Поиск рациональных конструктивных решений удобно вести с помощью аналитических методов расчета. Например, с применением вращательной жесткости внутримодульных узлов можно регулировать частоты колебания здания и, следовательно, усилия в элементах конструкции при динамических воздействиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Широков В.С. Конструктивные особенности модульных зданий // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14. № 3. DOI: 10.15862/03SAVN322
2. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Effect of inter-module connection stiffness on structural response of a modular steel building subjected to wind and earthquake load // Engineering Structures. 2020. Vol. 213. P. 110628. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110628
3. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Numerical study of the structural response to wind loading: modular building case study // 13th International Conference on Steel, Space and Composite Structures. 2018.
4. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Structural Response of Modular Buildings — An Overview // Journal of Building Engineering. 2018. Vol. 16. Pp. 45–56. DOI: 10.1016/j.jobe.2017.12.008
5. Annan C.D., Youssef M.A., El Naggar M.H. Seismic vulnerability assessment of modular steel buildings // Journal of Earthquake Engineering. 2009. Vol. 13. Issue 8. Pp. 1065–1088. DOI: 10.1080/13632460902933881
6. Fathieh A., Mercan O. Seismic evaluation of modular steel buildings // Engineering Structures. 2016. Vol. 122. Pp. 83–92. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.04.054
7. Malo K.A., Abrahamsen R.B., Bjertnæs M.A. Some structural design issues of the 14-storey timber framed building “Treef” in Norway // European Journal of Wood and Wood Products. 2016. Vol. 74. Issue 3. Pp. 407–424. DOI: 10.1007/s00107-016-1022-5
8. Choi K.-S., Lee H.-C., Kim H.-J. Influence of analytical models on the seismic response of modular structures // Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection. 2016. Vol. 20. Issue 2. Pp. 74–85. DOI: 10.11112/jksmi.2016.20.2.074
9. Shirokov V.S., Kholopov I.S., Solovjev A.V. Determination of the frequency of natural vibrations of a modular building // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 655–661. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.218
10. Широков В.С., Алтатов В.Ю., Гордеев Е.А. Исследование жесткости узлов соединений ригеля и стойки модульных быстровозводимых зданий // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 1. С. 20–29. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.20-29. EDN BTOSZA.
11. Широков В.С., Гордеева Т.Е. Исследование жесткости узла соединения ригеля со стойкой модульного здания // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6 (83). С. 90–96. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-6-90-96. EDN CCDCQT.
12. Туснина В.М., Коляго А.А. К вопросу действительной работы податливых узлов стальных каркасов многоэтажных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 2. С. 28–34. EDN YTCEAU.
13. Туснина В.М. Податливые соединения стальных балок с колоннами // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 5 (73). С. 25–39. DOI: 10.18720/MCE.73.3
14. Рюмин В.В. Анализ податливости рамных узлов на высокопрочных болтах // Современные строительные конструкции из металла и древесины. 2012. № 16 (1). С. 216–223.
15. Tusnina O.A., Danilov A.I. The stiffness of rigid joints of beam with hollow section column // Magazine of Civil Engineering. 2016. Vol. 64. Issue 04. Pp. 40–51. DOI: 10.5862/MCE.64.4
16. Бакианский И.С., Жабинский А.Н. Влияние конструктивных особенностей болтовых фланцевых узлов на распределение внутренних усилий в поперечной раме здания // Проблемы современного строительства : мат. Междунар. науч.-техн. конф. 2019. С. 49–59.
17. Туснина В.М., Платонова В.Д. Численный анализ жесткости фланцевых узлов «балка-колонна» // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 9. С. 28–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.28-33. EDN ELLJF.
18. Багаутдинов Р.И., Комаров Ю.П., Мостовский Н.Н., Дауров З.С. Numerical model of beam-to-column joint finite stiffness // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 2 (125). С. 179–187. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.179-187. EDN YXZHON.
19. Алтатов В.Ю., Лукин А.О., Сахаров А.А. Исследования жесткости узла базы стальной колонны, состоящей из одной опорной плиты // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 9. С. 9–14. EDN UKFKDV.
20. Choi K.-S., Kim H.-J. An analytical study on rotational capacity of beam-column joints in unit modular frames // International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering. 2015. Vol. 9. Issue 2. Pp. 100–103.

Поступила в редакцию 9 апреля 2023 г.

Принята в доработанном виде 11 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 13 июля 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: Вячеслав Сергеевич Широков — старший преподаватель кафедры металлических и деревянных конструкций; Самарский государственный технический университет (СамГТУ); 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; РИНЦ ID: 665300, ResearcherID: N-5278-2016, ORCID: 0000-0001-6285-8895; ShirokovViacheslav@gmail.com.

REFERENCES

1. Shirokov V.S. Design features of modular buildings. *The Eurasian Scientific Journal*. 2022; 3. DOI: 10.15862/03SAVN322 (rus.).
2. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Effect of inter-module connection stiffness on structural response of a modular steel building subjected to wind and earthquake load. *Engineering Structures*. 2020; 213:110628. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110628
3. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Numerical study of the structural response to wind loading: modular building case study. *13th International Conference on Steel, Space and Composite Structures*. 2018.
4. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Structural Response of Modular Buildings — An Overview. *Journal of Building Engineering*. 2018; 16:45-56. DOI: 10.1016/j.jobe.2017.12.008
5. Annan C.D., Youssef M.A., El Naggar M.H. Seismic vulnerability assessment of modular steel buildings. *Journal of Earthquake Engineering*. 2009; 13(8):1065-1088. DOI: 10.1080/13632460902933881
6. Fathieh A., Mercan O. Seismic evaluation of modular steel buildings. *Engineering Structures*. 2016; 122:83-92. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.04.054
7. Malo K.A., Abrahamsen R.B., Bjertnæs M.A. Some structural design issues of the 14-storey timber framed building “Treet” in Norway. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2016; 74(3):407-424. DOI: 10.1007/s00107-016-1022-5
8. Choi K.-S., Lee H.-C., Kim H.-J. Influence of analytical models on the seismic response of modular structures. *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*. 2016; 20(2):74-85. DOI: 10.11112/jksmi.2016.20.2.074
9. Shirokov V.S., Kholopov I.S., Solovjev A.V. Determination of the frequency of natural vibrations of a modular building. *Procedia Engineering*. 2016; 153:655-661. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.218
10. Shirokov V.S., Alpatov V.Yu., Gordeyev E.A. Research into the stiffness of beam-column joints of modular prefabricated buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(1):20-29. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.20-29. EDN BTOSZA. (rus.).
11. Shirokov V.S., Gordeeva T.E. Research of joint connection rigidity of crossbar and column in a modular building. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 6(83):90-96. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-6-90-96. EDN CCDCQT. (rus.).
12. Tusnina V.M., Kolyago A.A. To the issue of actual work of pliable nodes of steel frames of multi-story buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 2:28-34. EDN YTCEAU. (rus.).
13. Tusnina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 5(73):25-39. DOI: 10.18720/MCE.73.3 (rus.).
14. Rumin V.V. Analysis of rigidity of beam to column moment connections with high strength bolts. *Modern Metal and Wood Building Structures*. 2012; 16:216-223. (rus.).
15. Tusnina O.A., Danilov A.I. The stiffness of rigid joints of beam with hollow section column. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 64(04):40-51. DOI: 10.5862/MCE.64.4
16. Bakshanskiy I.S., Zhabinskiy A.N. Influence of constructive features of bolt flange units on the distribution of internal forces in the transverse frame of a building. *Problems of modern construction : materials of the International Scientific and Technical Conference: BNTU*. 2019; 49-59. (rus.).
17. Tusnina V.M., Platonova V.D. Numerical analysis of the stiffness of the “beam-column” flange joints. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 9:28-33. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.28-33. EDN ELLJF. (rus.).
18. Bagautdinov R.I., Komarov Yu.P., Mostovskiy N.N., Daurov Z.S. Numerical model of beam-to-column joint finite stiffness. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(2):(125):179-187. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.179-187. EDN YXZHOH. (rus.).
19. Alpatov V.Yu., Lukin A.O., Saharov A.A. The study of rigidity of a steel column base assembly consisting of a support plate. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 9:9-14. EDN UKFKDV. (rus.).
20. Choi K.-S., Kim H.-J. An analytical study on rotational capacity of beam-column joints in unit modular frames. *International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering*. 2015; 9(2):100-103.

Received April 9, 2023.

Adopted in revised form on April 11, 2023.

Approved for publication on July 13, 2023.

BIONOTES: Viacheslav S. Shirokov — senior lecturer of the Department of Metal and Wood Structures; Samara State Technical University (SSTU); 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ID RSCI: 665300, ResearcherID: N-5278-2016, ORCID: 0000-0001-6285-8895; ShirokovViacheslav@gmail.com.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1563-1573

Влияние возрастания характеристик грунтов в основании реконструируемых зданий на их осадку при устройстве подземной части

Надежда Сергеевна Никифорова, Николай Сергеевич Семенов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. С течением времени эксплуатации зданий и сооружений происходит уплотнение грунтов под подошвой их фундаментов от всех действующих нагрузок от здания. Цель исследования — изучение перемещений фундаментов здания во время устройства подземной части с возможным их превентивным усилением при реконструкции с учетом изменения прочностных и деформационных характеристик грунтов. Решение данной задачи позволит наиболее детально рассмотреть осадки зданий при реконструкции.

Материалы и методы. Выполнена серия численных расчетов в программном комплексе PLAXIS 2D взаимодействия фундамента с грунтом основания при реконструкции здания с освоением подземного пространства, включающего устройство двух или трех подземных этажей.

Результаты. Изучено влияние улучшенных характеристик грунта с учетом времени эксплуатации здания на осадку существующих фундаментов при реконструкции с освоением подземного пространства. Выявлено, что усиление фундаментов грунтоцементными элементами снижает осадку при реконструкции приблизительно в 2 раза. Рассмотрено влияние этажности проектируемой подземной парковки на напряженно-деформированное состояние грунтового массива.

Выводы. Проведенные численные исследования показали, что упрочнение грунтов под подошвой существующих фундаментов приводит к уменьшению осадки здания при реконструкции с освоением подземного пространства. Усиление существующего фундамента грунтоцементными элементами позволяет не превысить предельную дополнительную осадку реконструируемого здания. Выявлено снижение осадки существующих фундаментов при уменьшении этажности проектируемой подземной части.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подземное строительство, численное моделирование, реконструкция с освоением подземного пространства, усиление фундамента грунтоцементными элементами, окружающая застройка, изменение физико-механических грунтов под подошвой фундамента за время эксплуатации

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Никифорова Н.С., Семенов Н.С. Влияние возрастания характеристик грунтов в основании реконструируемых зданий на их осадку при устройстве подземной части // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 10. С. 1563–1573. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1563-1573

Автор, ответственный за переписку: Николай Сергеевич Семенов, 89252009999@mail.ru.

Influence of increasing soil characteristics at the base of reconstructed buildings on their settlement during the construction of the underground part

Nadezhda S. Nikiforova, Nikolai S. Semenov

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

ABSTRACT

Introduction. With the time of operation of buildings and structures, soil compaction occurs under the base of their foundations from all the acting loads from the building. The purpose of the research is to study the movements of the building foundations during the construction of the underground part with their possible preventive reinforcement during reconstruction, taking into account changes in the strength and deformation characteristics of soils. The solution of this problem will allow the most detailed consideration of buildings settlement during reconstruction.

Materials and methods. A series of numerical calculations in the PLAXIS 2D software package of the interaction of the foundation with the foundation soil during the reconstruction of a building with the development of underground space, including the construction of two or three underground floors, were carried out.

Results. The effect of taking into account the improved soil characteristics with regard to the time of building operation on the settlement of existing foundations during reconstruction with the development of underground space is studied. It was

revealed that the reinforcement of foundations with soil-cement elements reduces the settlement during reconstruction approximately in two times. The influence of the number of floors of the designed underground car park on the stress-strain state of the soil massif is considered.

Conclusions. Numerical studies show that strengthening of soils under the base of existing foundations leads to a decrease in the building settlement during reconstruction with the development of underground space. Reinforcement of the existing foundation with soil-cement elements makes it possible not to exceed the maximum additional settlement of the reconstructed building. A decrease in the settlement of existing foundations with a decrease in the number of storeys of the designed underground part is revealed.

KEYWORDS: underground construction, numerical modelling, reconstruction with the development of underground space, foundation reinforcement with soil-cement elements, surrounding buildings, change of physical and mechanical soils under the base of the foundation during operation

FOR CITATION: Nikiforova N.S., Semenov N.S. Influence of increasing soil characteristics at the base of reconstructed buildings on their settlement during the construction of the underground part. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(10):1563-1573. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1563-1573 (rus.).

Corresponding author: Nikolai S. Semenov, 89252009999@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

С увеличением плотности городской застройки крупных городов и мегаполисов возрастает необходимость освоения подземного пространства зданий и сооружений. В связи с этим появляется потребность в решении задач по обеспечению сохранности окружающей застройки. Основной причиной освоения подземного пространства городов является нехватка свободных территорий из-за сформировавшейся исторической застройки, в частности, в центральной части населенных пунктов.

Данными проблемами занимались отечественные и зарубежные авторы [1–10]. Перспективы освоения подземного пространства урбанизированных территорий рассматривались в работах [11–15], а их риски — в публикациях [16–18]. Для сохранения целостности окружающей застройки и уменьшения влияния на нее при строительстве могут использоваться различные защитные мероприятия, описанные в исследованиях [19–22]. О методике расчетов технологических осадок оснований при устройстве котлованов писал Р.А. Мангушев [23]. Подобные расчеты с помощью численного моделирования влияния строительства на окружающую застройку приведены в трудах [24, 25].

Основная задача настоящей статьи — расчет осадок фундаментов реконструируемого здания с их возможным усилением по технологии струйной цементации при устройстве подземной парковки под пятном застройки с учетом изменения во времени физико-механических характеристик грунтов под подошвой фундаментов за период длительной эксплуатации здания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Согласно п. 9.33 СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений», актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83, при устройстве глубоких котлованов следует выполнять геотехнический прогноз влияния изменения напряженно-деформированного

состояния (НДС) грунтового массива на фундаменты существующих зданий.

В качестве объекта исследования рассмотрено историческое здание, расположенное в центральной части Москвы, под пятном застройки которого устраивается три подземных этажа автостоянки. Для изучения влияния этажности подземной части на фундаменты реконструируемого здания анализируется случай с двухуровневой подземной парковкой. Для решения поставленной в статье задачи проводилось численное моделирование с помощью программного комплекса PLAXIS 2D.

Реконструируемое здание построено в 1927 г., пятиэтажное с подвальным помещением, в плане сложной формы. В осях максимальные размеры здания составляют 107,4 × 65,0 м. Конструктивная схема здания — с полным железобетонным монолитным каркасом. Наружные стены — кирпичные, толщиной от 700 до 1000 мм с учетом отделки. Колонны каркаса здания выполнены из монолитного железобетона. Колонны подвала имеют сечение 1000 × 800 мм, колонны среднего ряда — 700 × 700 мм. Фундаментом здания служит ленточный фундамент из монолитного железобетона. Глубина заложения подошвы фундаментов от уровня пола подвала составляет 500–3200 мм. Ширина подошвы ленточного фундамента колеблется от 1000 до 4500 мм.

По категории технического состояния несущих строительных конструкций здание оценивается как работоспособное (II категория). Согласно СП 22.13330.2016 приложение Е, предельные дополнительные деформации основания фундаментов реконструируемых зданий и сооружений от влияния нового строительства не должны превышать: максимальная дополнительная осадка — 15,0 мм, дополнительная относительная разность осадок — 0,0009. Нагрузка на фундаменты здания принята равной 350 кПа.

Физико-механические характеристики грунтов приведены в табл. 1. В гидрогеологическом соотношении участок строительства характеризуется подземными безнапорными водами, вскрытыми на глубине 11,3–16,5 м от поверхности земли.

Табл. 1. Физико-механические характеристики грунтов

Table 1. Physical and mechanical characteristics of soils

Описание грунта Soil description	Плотность ρ , г/см ³ Density ρ , g/cm ³	Коэффициент пористости e Porosity coefficient e	Угол внутреннего трения φ , град / Angle of internal friction φ , deg	Сцепление C , МПа Coupling C , MPa	Модуль деформации E , МПа Deformation modulus E , MPa
Насыпной грунт Bulk soil	1,69	0,86	29	2	12
Песок мелкий, средней плотности Sand fine, medium density	1,87	0,61	33	3	29
Песок средней крупности, средней плотности Sand of medium size, medium density	1,91	0,62	33	1	30
Суглинок Loam	2,13	0,49	22	39	23
Глина полутвердая Semi-hard clay	1,80	1,15	13	76	19
Известняк низкой прочности Low strength limestone	2,12	Предел прочности на одноосное сжатие $R_{ск} — 0,75$ МПа Ultimate strength for uniaxial compression $R_{sch} — 0.75$ MPa			
Известняк низкой прочности Low strength limestone	2,15	Предел прочности на одноосное сжатие $R_{ск} — 2,1$ МПа Ultimate strength for uniaxial compression $R_{sch} — 2.1$ MPa			

С течением времени от веса конструкций и полезных нагрузок, передающихся от здания на грунт, происходит увеличение прочностных и деформационных характеристик грунтов под подошвой фундамента. На основе натурных исследований, реализовавшихся в ЦНИИПромзданий [26], получены эмпирические зависимости, дающие возможность прогнозировать изменение угла внутреннего трения φ и удельного сцепления C песчаных грунтов от периода эксплуатации здания:

- пески крупные и средней крупности:

$$\varphi_t = \varphi_0 + 0,0614 \cdot t; \quad (1)$$

$$C_t = C_0 + 0,0372 \cdot t; \quad (2)$$

- пески мелкие:

$$\varphi_t = \varphi_0 + 0,0369 \cdot t; \quad (3)$$

$$C_t = C_0 + 0,0490 \cdot t; \quad (4)$$

- пески пылеватые:

$$\varphi_t = \varphi_0 + 0,0662 \cdot t; \quad (5)$$

$$C_t = C_0 + 0,0190 \cdot t; \quad (6)$$

где φ_t , C_t — угол внутреннего трения и удельное сцепление уплотненного грунта соответственно для прогнозируемого времени t ; φ_0 , C_0 — то же для грун-

та, находившегося до обжатия его давлением от здания; t — время эксплуатации основания (годы).

В монографии П.А. Коновалова «Основания и фундаменты реконструируемых зданий» [26] описаны закономерности изменения физико-механических свойств грунтов под подошвой фундаментов при их длительной эксплуатации для песков в зависимости от действующей нагрузки на фундамент (табл. 2). Помимо этого, А.И. Полищук в работе «Основы проектирования и устройства фундаментов реконструируемых зданий» [27] приводит коэффициенты, позволяющие устанавливать соотношение значений характеристик уплотненных и неуплотненных грунтов (табл. 3).

Для установления изменения свойств глин и суглинков вычисляется расчетное сопротивление грунта под подошвой фундаментов под наружную и внутреннюю стену, так как фундаменты имеют различные габариты в плане и по глубине заложения. Определение расчетного сопротивления грунта основания R производится согласно СП 22.13330.2016 (формула (5.7)), после чего с учетом коэффициентов, выявленных А.И. Полищуком, вычисляются увеличенные характеристики грунта.

В настоящих расчетах учитываются возможные варианты предварительного усиления фундаментов здания грунтоцементными сваями Ø300 и Ø800 мм в непосредственной близости к проектируемому котловану по технологии Jet-Grouting.

Для моделирования НДС грунта основания использовалась математическая упругопластическая

Табл. 2. Изменение модуля деформации песка в зависимости от степени его уплотнения [26]

Table 2. Change in the deformation modulus of sand depending on the degree of its compaction [26]

Грунт Soil	Отношение модуля деформации уплотненных $E_{уп}$ и неуплотненных E грунтов ($E_{уп}/E$) при давлении, кПа The ratio of the deformation modulus of compacted E_{com} and non-compacted E soils (E_{com}/E) at pressure, kPa					
	100	200	300	400	500	600
Песок мелкий Fine sand	–	2,7	3,8	3,9	3,9	4,2
Песок средней крупности Medium-sized sand	–	2,2	2,1	1,9	1,7	1,6

Табл. 3. Значения коэффициентов K_γ , K_ϕ , K_c для определения измененных прочностных характеристик грунта [27]

Table 3. The values of the coefficients K_γ , K_ϕ , K_c to determine the changed strength characteristics of the soil [27]

Грунты основания реконструируемых и восстанавливаемых зданий The soils of the foundations of reconstructed and restored buildings	Параметр P/R The P/R parameter	Коэффициенты Coefficients		
		K_γ	K_ϕ	K_c
1. Глинистые грунты с $I_L \leq 0,5$ и при сроке эксплуатации здания более 15 лет 1. Clay soils with $I_L \leq 0.5$ and the service life of the building is more than 15 years	Более 0,8 More than 0.8	1,07–1,17	1,10	1,6
	0,8–0,5	1,03–1,05	1,05	1,32
	Менее 0,5 Less than 0.5	1,0	1,0	1,05
2. Глинистые грунты с $I_L > 0,5$ и при сроке эксплуатации здания более 15 лет 2. Clay soils with $I_L > 0.5$ and the service life of the building is more than 15 years	Более 0,8 More than 0.8	1,05–1,15	1,08	1,45
	0,8–0,5	1,0–1,05	1,04	1,25
	Менее 0,5 Less than 0.5	1,0	1,0	1,05
3. Глинистые грунты при наличии подземной воды в уровне заложения фундаментов и сроке эксплуатации здания более 15 лет 3. Clay soils in the presence of underground water at the foundation level and the service life of the building is more than 15 years	Более 0,8 More than 0.8	1,03	0,97	1,3
	0,8–0,5	1,03	0,88	1,06
	Менее 0,5 Less than 0.5	1,0	0,8	0,85

модель Кулона – Мора. Рассмотрено 5 вариантов устройства подземной парковки под пятном реконструируемого здания.

Вариант 1. Разработка грунта до проектной отметки с помощью устройства ограждения котлована из железобетонной «стены в грунте» толщиной 800 мм, длиной 12,0 м, заглубленной в грунт ниже проектируемой поверхности откопки дна котлована на 2,0 м. Раскрепление выполняется при помощи стальных обвязочных балок и распорок из стальных труб в 3 уровня сечениями 426 × 10 мм, 530 × 11 мм с шагом 4 м.

Вариант 2. Разработка грунта до проектной отметки с помощью устройства ограждения котлована из железобетонной «стены в грунте» толщиной 800 мм, длиной 12,0 м, заглубленной в грунт ниже проектируемой поверхности откопки дна котлована на 2,0 м с усилением существующего ближайшего к котловану фундамента здания грунтоцементными элементами по технологии струйной цементации Jet-Grouting. Раскрепление выполняется при

помощи стальных обвязочных балок и распорок из стальных труб в 2 уровня сечениями 426 × 10 мм, 530 × 11 мм с шагом 4 м.

Варианты 3 и 4 аналогичны вариантам 1 и 2 соответственно, но при этом учитывают изменения прочностных и деформационных характеристик грунтов под подошвой фундаментов здания от времени эксплуатации.

Вариант 5. Строительство двухэтажной подземной парковки с помощью устройства ограждения котлована из железобетонной «стены в грунте» толщиной 800 мм, длиной 12,0 м, заглубленной в грунт ниже проектируемой поверхности откопки дна котлована на 5,1 м. Раскрепление выполняется при помощи стальных обвязочных балок и распорок из стальных труб в 2 уровня сечениями 426 × 10 мм и 530 × 11 мм с шагом 4 м. Учитывается изменение прочностных и деформационных характеристик грунтов под подошвой фундаментов здания от времени эксплуатации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе зависимостей (1)–(4) и данных табл. 2, 3 получены увеличенные физико-механические характеристики грунтов с учетом времени эксплуатации здания (табл. 4), составляющего 96 лет.

В ходе численного моделирования выполнены расчеты влияния устройства подземной парковки на существующее реконструируемое здание.

Полученные результаты зависели от следующих условий:

1) изменение физико-механических характеристик грунтов под фундаментами за время длительной эксплуатации здания;

2) усиление фундамента грунтоцементными элементами;

3) учет этажности подземной части здания.

Результаты расчетов для пяти вариантов представлены на рисунке и сведены в общую таблицу (см. табл. 5).

Осадки фундамента с учетом коэффициентов, увеличивающих физико-механические характеристики грунтов, выявленных исследованиями П.А. Коновалова и А.И. Полищука, уменьшаются на 4,0 мм для случаев, не предусматривающих усиление существующего фундамента (варианты 1, 3), и уменьшаются на 1,8 мм для случаев с превентивным усилением фундамента грунтоцементными элементами (вари-

анты 2, 4), т.е. учет данных коэффициентов снижает осадку фундамента приблизительно на 13–14 %. Усиление ближайшего к котловану фундамента здания грунтоцементными элементами позволяет снизить его осадку приблизительно в 2 раза.

При уменьшении этажности проектируемой парковки на один этаж осадка фундамента составляет 19,5 мм (вариант 5), что на 20 % меньше, чем при строительстве трехэтажной, осадка при строительстве которой составляет 24,1 мм (вариант 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнен расчет изменения физико-механических характеристик грунта во время эксплуатации, опираясь на экспериментальные зависимости П.А. Коновалова и А.И. Полищука. Увеличение угла внутреннего трения при использовании эмпирических зависимостей для песков составило 3,5–5,9 град, а удельного сцепления — в 2–4 раза. Для глинистых грунтов угол внутреннего трения изменился на 1,1 град, а удельное сцепление — в 1,1–1,3 раза.

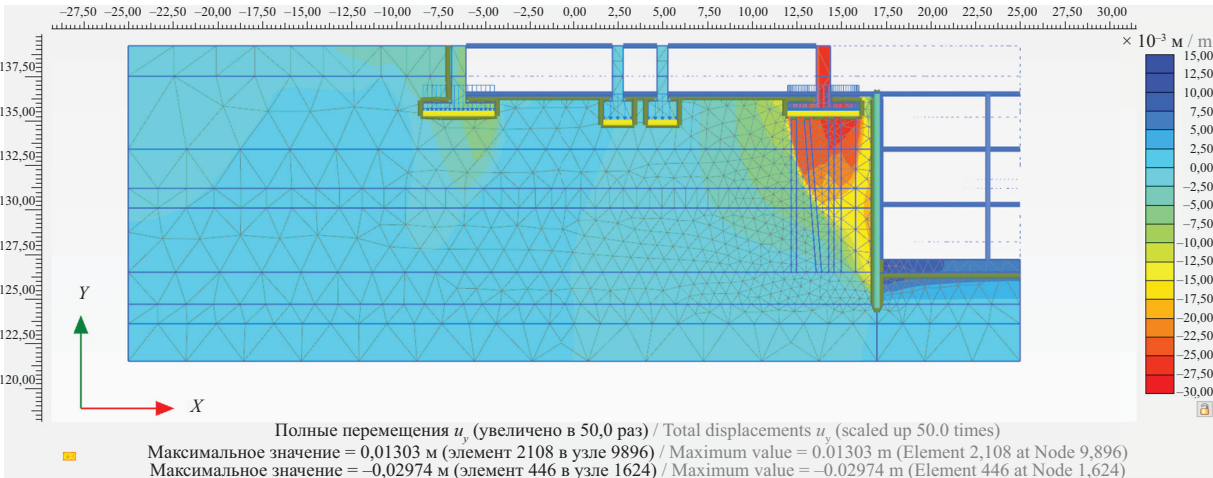
Проведенные расчеты показали, что:

- превентивное усиление существующего фундамента грунтоцементными элементами (вариант 2, 4) позволяет не превышать дополнительные предельные значения деформаций основания для

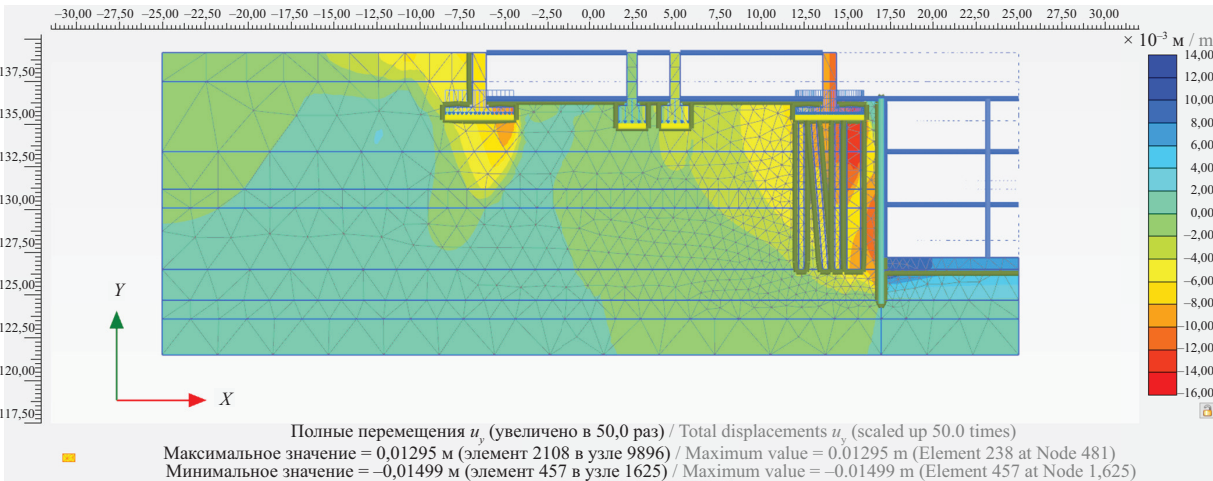
Табл. 4. Увеличенные физико-механические характеристики грунтов

Table 4. Increased physical and mechanical characteristics of soils

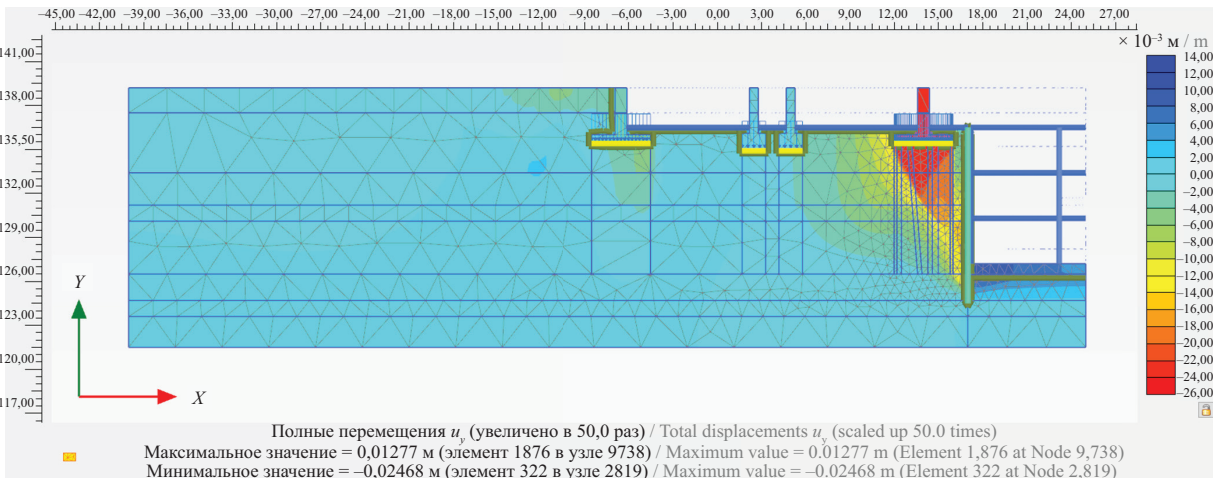
Описание грунта Soil description	Плотность ρ , г/см ³ Density ρ , g/cm ³	Коэффициент пористости e Porosity coefficient e	Угол внутреннего трения φ , град / Angle of internal friction φ , deg	Сцепление C , МПа Coupling C , MPa	Модуль деформации E , МПа Deformation modulus E , MPa
Песок мелкий, средней плотности Sand fine, medium density	1,87	0,61	36,5	7,7	111,7
Песок средней крупности, средней плотности Sand of medium size, medium density	1,91	0,62	38,9	4,6	115,5
Суглинок (под фундаментами наружных стен) Loam (under the foundations of the exterior walls)	2,13	0,45	22	41,0	34
Суглинок (под внутренними фундаментами) Loam (under internal foundations)	2,24	0,45	23,1	51,5	34
Глина полутвердая (под фундаментами наружных стен) Semi-hard clay (under the foundations of the exterior walls)	1,80	0,65	13	79,8	24
Глина полутвердая (под внутренними фундаментами) Semi-hard clay (under internal foundations)	1,90	0,65	13,7	100,3	28



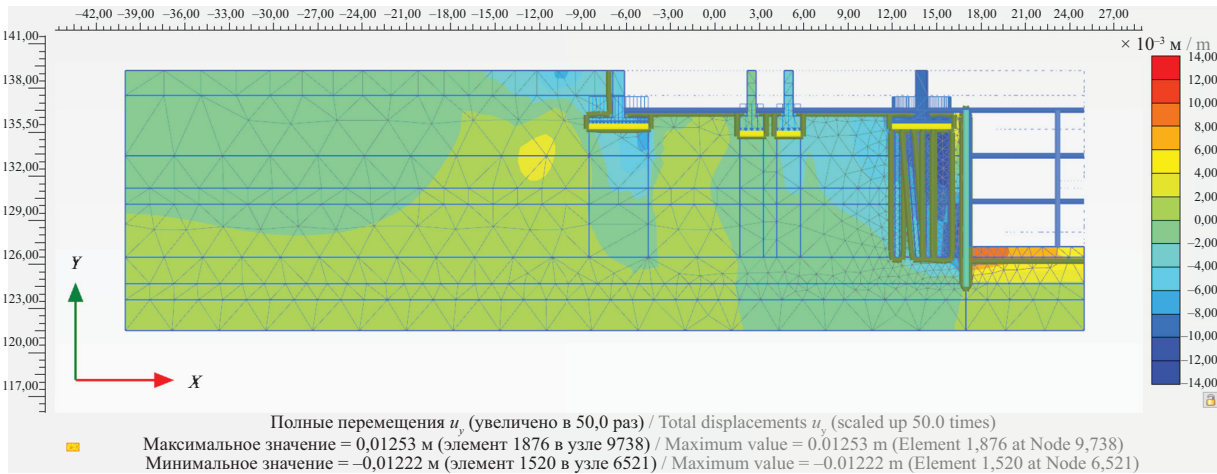
a



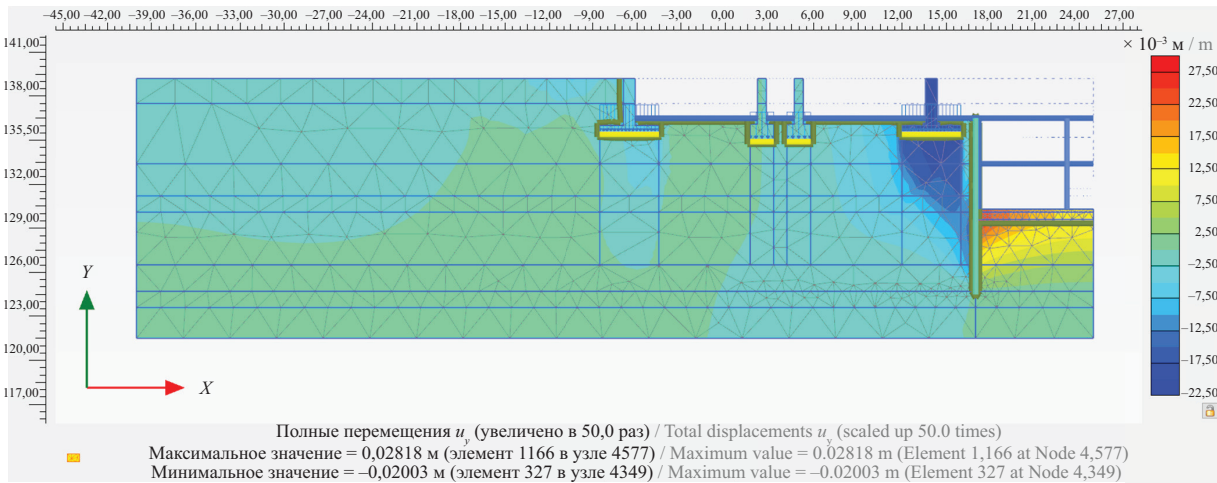
b



c



d



e

Поля вертикальных перемещений после завершения строительства подземной автопарковки: *a* — вариант 1; *b* — вариант 2; *c* — вариант 3; *d* — вариант 4; *e* — вариант 5

Fields of vertical movements after the completion of the construction of an underground car park: *a* — option 1; *b* — option 2; *c* — option 3; *d* — option 4; *e* — option 5

Табл. 5. Основные расчетные варианты и полученные значения деформаций оснований фундаментов

Table 5. Main design options and obtained values of foundation deformations

Рассмотренные варианты Considered options	Осадка ближайшего к котловану фундамента после завершения строительства парковки, мм Settlement of the foundation closest to the foundation pit after the completion of the construction of the parking lot, mm	Относительная разность осадок Relative sediment difference
Вариант 1. Ограждение из «стены в грунте» толщиной 800 мм без усиления фундамента Option 1. Fence from “wall in the ground” 800 mm thick without strengthening the foundation	28,1	0,0025
Вариант 2. Ограждение из «стены в грунте» толщиной 800 мм с усилением фундамента Option 2. Fence from “wall in the ground” 800 mm thick with foundation reinforcement	13,6	0,0008

Окончание табл. 5 / End of the Table 5

Рассмотренные варианты Considered options	Осадка ближайшего к котловану фундамента после завершения строительства парковки, мм Settlement of the foundation closest to the foundation pit after the completion of the construction of the parking lot, mm	Относительная разность осадок Relative sediment difference
Вариант 3. Ограждение из «стены в грунте» толщиной 800 мм без усиления фундамента (с измененными физико-механическими характеристиками) Option 3. Fence from a “wall in the ground» 800 mm thick without strengthening the foundation (with changed physical and mechanical characteristics)	24,1	0,0021
Вариант 4. Ограждение из «стены в грунте» толщиной 800 мм с усилением фундамента (с измененными физико-механическими характеристиками) Option 4. Fence from a “wall in the ground” 800 mm thick with foundation reinforcement (with changed physical and mechanical characteristics)	11,8	0,0007
Вариант 5. Ограждение из «стены в грунте» толщиной 800 мм без усиления фундамента со строительством двухэтажной подземной парковки (с измененными физико-механическими характеристиками) Option 5. Fence from a “wall in the ground” 800 mm thick without strengthening the foundation with the construction of a two-story underground car park (with modified physical and mechanical characteristics)	19,5	0,0017

реконструируемых зданий, согласно приложению Е СП 22.13330.2016, что обеспечивает конструкционную безопасность существующего исторического здания;

- учет изменения физико-механических характеристик грунтов дает возможность снизить осадки здания при реконструкции с освоением подземного пространства;
- уменьшение этажности проектируемой подземной части на один этаж (с трех до двух этажей) снижает осадку ближайшего к котловану фундамента здания до 20 %.

В инженерно-геологических условиях, характерных для центральной части г. Москвы, в плотной городской застройке возможно производить реконструкцию исторического здания с устройством под ним подземной автостоянки с превентивным усилением существующих фундаментов грунтоцементными элементами. Учет уплотнения грунтов под существующими фундаментами здания за период его длительной эксплуатации снижает осадку до 14 %, что может иметь значение для реконструируемых зданий при решении вопроса о необходимости применения защитных мероприятий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мангушев Р.А., Осокин А.И. Опыт реконструкции шестизэтажного здания с подземным пространством в центральной части Санкт-Петербурга // Современные геотехнологии в строительстве и их научно-техническое сопровождение : мат. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 80-летию образования каф. геотехники СПбГАСУ (механики грунтов, оснований и фундаментов ЛИСИ) и 290-летию российской науки. СПб. : СПбГАСУ, 2014. Ч. 1. С. 60–72.

2. Савинов А.В. Освоение подземного пространства при реконструкции Саратовской областной филармонии им. А. Шнитке // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2014. № 3. С. 217–230.

3. Мангушев Р.А. Устройство подземного пространства при реконструкции административного здания // Жилищное строительство. 2014. № 9. С. 3–9. EDN SMVCMJ.

4. Чистяков Д.А., Калугин А.Н., Туркина Е.А. Реконструкция зданий в условиях исторической застройки города (на примере реконструкции Политехнического музея в Москве) // Инновации и инвестиции. 2021. № 3. С. 293–296. EDN WIOPIU.

5. Мангушев Р.А., Конюшков В.В., Сапин Д.А. Инженерно-геотехнические изыскания при строительстве и реконструкции в условиях плотной городской застройки // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 5. С. 47–54. EDN VZDPZF.

6. Pilat S.Z. Reconstructing Italy: The Ina-Casa neighborhoods of the Postwar Era. Farnham : Ashgate, 2016. 306 p.

7. Коносова А.Е., Ламута В.В. Анализ существующих методов устройства подземного пространства под зданиями при их реконструкции // Colloquium-journal. 2020. № 14 (66). С. 61–64. DOI: 10.24411/2520-6990-2020-11898

8. Орехов В.В., Алексеев Г.В. Прогноз влияния строительства подземного комплекса на окружающую застройку // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 8 (107). С. 839–845. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.8.839-845

9. Mangushev R.A., Nikiforova N.S. Prediction of technological settlements for existing buildings during underground construction // 17th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering, ECSMGE 2019 — proceedings. 2019. DOI: 10.32075/17ECSMGE-2019-0194. EDN RIVUEE.

10. Mangushev R.A., Nikiforova N.S. Technological Settlements of the Surrounding Buildings during the Construction of Deep Pit Fences // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2023. Vol. 60. Issue 1. Pp. 15–21. DOI: 10.1007/s11204-023-09858-3

11. Wang H. Earth human settlement ecosystem and underground space research // Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. Pp. 765–781. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.774

12. Chen J., Huang L., Su L. Toward a more compact and sustainable city — the use of underground space for Chinese mainland cities // Green Building, Environment, Energy and Civil Engineering. 2016. Pp. 341–344. DOI: 10.1201/9781315375106-73

13. Храбатина Н.В., Пусный Л.А., Дубино А.М. Освоение подземного пространства мегаполисов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 1. С. 61–65. DOI: 10.12737/article_5a5dbf083529a8.09766561. EDN YNSCND.

14. Осокин А.И., Денисова О.О., Шахтарина Т.Н. Технологическое обеспечение подземного строительства в условиях городской застройки // Жилищное строительство. 2014. № 3. С. 16–24. EDN RXOKJB.

15. Мангушев Р.А., Осокин А.И., Левинская П.Г. Перспективы устройства подземных паркингов в условиях стесненной застройки исторического центра Санкт-Петербурга // Жилищное строительство. 2019. № 4. С. 3–18. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-4-3-18. EDN MDIWKD.

16. Долев А.А. Риски при устройстве котлованов для строительства Московского метрополитена // Метро и тоннели. 2022. № 1. С. 13–16. EDN OSXMBV.

17. Lebedev M.O., Romanevich K.V. Risk management in the development of underground space in Russian cities // Reliability: Theory & Applications. 2022. Vol. 17.

Special Issue 4 (70). Pp. 146–159. DOI: 10.24412/1932-2321-2022-470-146-159

18. Mikhaylova T., Parshin D., Shoshinov V., Trebukhin A. Architectural and town-planning reconstruction problems of the city of Voronezh // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 33. P. 01033. DOI: 10.1051/e3sconf/20183301033

19. Ponomarev A.B., Kaloshina S.V. Influence of Slab Foundations Constructed in Dense Urban Settings on Settlement of Existing Buildings // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2013. Vol. 50. Issue 5. Pp. 194–199. DOI: 10.1007/s11204-013-9233-9

20. Ильичев В.А., Никуфорова Н.С., Готман Ю.А., Туликов М.М., Трофимов Е.Ю. Анализ применения активных и пассивных методов защиты существующей застройки при подземном строительстве // Жилищное строительство. 2013. № 6. С. 25–27. EDN QILIVF.

21. Калюшина С.В., Кудашева М.И., Золотозубов Д.Г. Исследование влияния разработки траншей на дополнительные осадки существующего здания // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2018. Т. 9. № 4. С. 115–130. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.4.11

22. Nikiforova N., Konnov A., Zakirova A. The choice of effective geotechnologies to ensure the preservation of historic buildings during their renovation with the underground space development // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. P. 042012. DOI: 10.1088/1757-899X/463/4/042012

23. Мангушев Р.А., Конюшков В.В., Кондратьева Л.Н., Кириллов В.М. Методика расчета технологической осадки основания фундаментов зданий соседней застройки при устройстве котлованов // Жилищное строительство. 2019. № 9. С. 3–11. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-9-3-10. EDN FMGQTO.

24. Пономарев А.Б., Калюшина С.В., Захаров А.В., Безгодов М.А., Шенкман Р.И., Золотозубов Д.Г. Результаты геотехнического моделирования влияния устройства глубокого котлована на существующую застройку // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2014. № 4. С. 188–201. EDN SFACJP.

25. Строкова Л.А., Тарек С.С.Т., Голубева В.В., Иванов В. Численное моделирование влияния упрочнения грунтового массива цементно-песчаной инъекцией на деформации основания // Известия Томского политехнического университета. 2017. Т. 328. № 10. С. 6–17. EDN ZWHCVH.

26. Коновалов П.А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. 4-е издание. М., 2000. 318 с.

27. Полищук А.И. Основы проектирования и устройства фундаментов реконструируемых зданий. Нортхэмптон; Томск : STT, 2004. 476 с.

Поступила в редакцию 25 мая 2023 г.

Принята в доработанном виде 30 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 3 июля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Надежда Сергеевна Никифорова — доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 546750, Scopus: 7005513559, ResearcherID: P-3429-2015, ORCID: 0000-0002-0611-4354; n-nikiforova@yandex.ru;

Николай Сергеевич Семенов — магистрант; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; 89252009999@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Mangushev R.A., Osokin A.I. Experience in the reconstruction of a six-story building with underground space in the central part of St. Petersburg. *Modern geotechnologies in construction and their scientific and technical support : materials of the international. sci-tech. conf., dedicated 80th anniversary of the formation of the department. geotechnics of SPbGASU (mechanics of soils, bases and foundations LISI) and the 290th anniversary of Russian science*. St. Petersburg, SPbGASU, 2014; 1:60-72. (rus.).
2. Savinov A.V. The underground space utilization in reconstruction of Saratov regional Alfred Schnittke philharmonia. *Bulletin of PNRPU. Construction and architecture*. 2014; 3:217-230. (rus.).
3. Mangushev R.A. Arrangement of the underground space when reconstructing administrative building. *Housing Construction*. 2014; 9:3-9. EDN SMVCMJ. (rus.).
4. Chistyakov D.A., Kalugin A.N., Turkina E.A. Reconstruction of buildings in the context of the historical development of the city (on the example of the reconstruction of the polytechnic museum in Moscow). *Innovation and investment*. 2021; 3:293-296. EDN WIOPIU. (rus.).
5. Mangushev R.A., Konyushkov V.V., Sapin D.A. Engineering and geotechnical surveys during construction and reconstruction in conditions of dense urban development. *Industrial and civil engineering*. 2016; 5:47-54. EDN VZDPZF. (rus.).
6. Pilat S.Z. *Reconstructing Italy: The Ina-Casa neighborhoods of the Postwar Era*. Farnham, Ashgate, 2016; 306.
7. Kuposova A.E., Latuta V.V. Analysis of existing methods for device underground space under buildings during reconstruction. *Colloquium-journal*. 2020; 14(66):61-64. DOI: 10.24411/2520-6990-2020-11898 (rus.).
8. Orekhov V.V., Alekseev G.V. Forecast of Influencing the Underground Complex Construction on a Context Area. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017; 12(8):(107):839-845. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.8.839-845 (rus.).
9. Mangushev R.A., Nikiforova N.S. Prediction of technological settlements for existing buildings during underground construction. *17th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering, ECSMGE 2019 — proceedings*. 2019. DOI: 10.32075/17ECSMGE-2019-0194. EDN RIVUEE.
10. Mangushev R.A., Nikiforova N.S. Technological Settlements of the Surrounding Buildings during the Construction of Deep Pit Fences. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2023; 60(1):15-21. DOI: 10.1007/s11204-023-09858-3
11. Wang H. Earth human settlement ecosystem and underground space research. *Procedia Engineering*. 2016; 165:765-781. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.774
12. Chen J., Huang L., Su L. Toward a more compact and sustainable city — the use of underground space for Chinese mainland cities. *Green Building, Environment, Energy and Civil Engineering*. 2016; 341-344. DOI: 10.1201/9781315375106-73
13. Hrabatina N.V., Pusnyj L.A., Dubino A.M. Development of the underground space of megacities. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018; 1:61-65. DOI: 10.12737/article_5a5dbf083529a8.09766561. EDN YNSCND. (rus.).
14. Osokin A.I., Denisova O.O., Shahtarina T.N. Technological support of underground construction in the conditions of urban development. *Housing Construction*. 2014; 3:16-24. EDN RXOKJB. (rus.).
15. Mangushev R.A., Osokin A.I., Levinskaya P.G. Prospects for the construction of underground parkings under conditions of tight development of the historic center of St. Petersburg. *Housing Construction*. 2019; 4:3-18. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-4-3-18. EDN MDIWKD. (rus.).
16. Dolev A.A. Pits construction risks during Moscow metro construction. *Metro and Tunnels*. 2022; 1:13-16. EDN OSXMBV. (rus.).
17. Lebedev M.O., Romanovich K.V. Risk management in the development of underground space in Russian cities. *Reliability: Theory & Applications*. 2022; 17(4):(70):146-159. DOI: 10.24412/1932-2321-2022-470-146-159
18. Mikhaylova T., Parshin D., Shoshinov V., Trebukhin A. Architectural and town-planning reconstruction problems of the city of Voronezh. *E3S Web of Conferences*. 2018; 33:01033. DOI: 10.1051/e3s-conf/20183301033

19. Ponomarev A.B., Kaloshina S.V. Influence of Slab Foundations Constructed in Dense Urban Settings on Settlement of Existing Buildings. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2013; 50(5):194-199. DOI: 10.1007/s11204-013-9233-9

20. Il'ichev V.A., Nikiforova N.S., Gotman Yu.A., Tupikov M.M., Trofimov E.Yu. Analysis of the application of active and passive protection methods in underground construction. *Housing Construction*. 2013; 6:25-27. EDN QILIVF. (rus.).

21. Kaloshina S.V., Kudasheva M.I., Zolotozubov D.G. Study of the effect of trenching on additional settlements of an existing building. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018; 9(4):115-130. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.4.11 (rus.).

22. Nikiforova N., Konnov A., Zakirova A. The choice of effective geotechnologies to ensure the preservation of historic buildings during their renovation with the underground space development. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 463:042012. DOI: 10.1088/1757-899X/463/4/042012

23. Mangushev R.A., Konyushkov V.V., Kondrat'eva L.N., Kirillov V.M. Method for calculat-

ing the technological settlement of the foundations of the foundations of buildings of neighboring buildings when arranging pits. *Housing Construction*. 2019; 9:3-11. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-9-3-10. EDN FMGQTO. (rus.).

24. Ponomarev A.B., Kaloshina S.V., Zaharov A.V., Bezgodov M.A., Shenkman R.I., Zolotozubov D.G. Results of geotechnical modeling of the impact of a deep pit on the existing building. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture*. 2014; 4:188-201. EDN SFACJP. (rus.).

25. Strokova L.A., Tarek S.S.T., Golubeva V.V., Ivanov V. Numerical modeling of the effect of soil mass hardening by cement-sand injection on base deformations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2017; 328(10):6-17. EDN ZWHCVH. (rus.).

26. Kononov P.A. *Bases and foundations of reconstructed buildings. 4-th edition*. Moscow, 2000; 318. (rus.).

27. Polishchuk A.I. *Fundamentals of design and installation of foundations for reconstructed buildings*. Northampton; Tomsk, STT, 2004; 476. (rus.).

Received May 25, 2023.

Adopted in revised form on May 30, 2023.

Approved for publication on July 3, 2023.

BIONOTES: Nadezhda S. Nikiforova — Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 546750, Scopus: 7005513559, ResearcherID: P-3429-2015, ORCID: 0000-0002-0611-4354; n-nikiforova@yandex.ru;

Nikolai S. Semenov — master student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; 89252009999@mail.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

Влияние коэффициента неравномерности расширения грунтового образца на механические характеристики

Армен Завенович Тер-Мартirosян¹, Георгий Олегович Анжело¹,
Любовь Юрьевна Ермошина¹, Илья Алексеевич Боков¹,
Артур Ванушевич Манукян²

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

² Концерн МонАрх; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Наиболее распространенным методом определения механических характеристик грунта является испытание в приборе трехосного сжатия. Данный вид испытаний широко используется в прикладных и научных целях, и описан в работах как отечественных, так и зарубежных авторов, а также в нормативно-технической документации. Однако в рамках научных работ различных авторов коэффициент неравномерности расширения грунтового образца при трехосных испытаниях зачастую остается без должного внимания и не учитывается при обработке результатов испытаний. В существующих актуальных нормативно-технических документах, таких как ГОСТ 12248.3–2020, учет коэффициента неравномерности расширения образца грунта при трехосном сжатии b носит рекомендательный характер.

Материалы и методы. Проведены экспериментальные исследования методом трехосного сжатия на образцах песчаного грунта различного гранулометрического состава с целью определения его механических характеристик с использованием двух различных методик обработки результатов лабораторных испытаний — с учетом коэффициента неравномерности расширения грунтового образца и без его учета.

Результаты. По результатам выполненных экспериментальных исследований получено, что исключение из процесса обработки результатов лабораторных испытаний коэффициента нелинейности расширения b приводит к значительному завышению значений угла внутреннего трения. Однако значения секущего модуля деформации при 50%-ной прочности E_{50} при исключении из процесса обработки коэффициента нелинейности расширения стали ниже в среднем на 7,7 %.

Выводы. Анализируя полученные результаты, а также учитывая различные факторы, влияющие на результаты исследования (плотность, влажность и т.д.), требуется проведение дополнительных лабораторных испытаний с целью дальнейшего уточнения корреляционных зависимостей при определении прочностных и деформационных характеристик песчаных грунтов с учетом и без учета коэффициента b .

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: лабораторные испытания, трехосное сжатие, песок, прочностные характеристики, деформационные характеристики, коэффициент неравномерности расширения образца грунта при трехосном сжатии

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тер-Мартirosян А.З., Анжело Г.О., Ермошина Л.Ю., Боков И.А., Манукян А.В. Влияние коэффициента неравномерности расширения грунтового образца на механические характеристики // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 10. С. 1574–1586. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1574-1586

Автор, ответственный за переписку: Илья Алексеевич Боков, ilililila@yandex.ru.

Influence of the coefficient of non-uniform expansion of the soil sample on mechanical characteristics

Armen Z. Ter-Martirosyan¹, Georgiy O. Anzhelo¹, Lyubov Yu. Ermoshina¹,
Ilya A. Bokov¹, Artur V. Manukyan²

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

² Concern MonArch; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The most common method of determining the mechanical characteristics of the soil is triaxial compression testing. This type of testing is widely used both for applied and scientific purposes, and is described in the works of both domestic and foreign authors, as well as in regulatory and technical documentation. However, within the framework of scientific works by various authors, the coefficient of uneven expansion of a soil sample during triaxial tests is often neglected and is not taken into account when processing the test results. In the existing current regulatory and technical documents, such as GOST 12248.3–2020, consideration of the coefficient of uneven expansion of the soil sample under triaxial compression b is of a recommendatory nature.

Materials and methods. Within the framework of the work, experimental studies by the triaxial compression method were carried out on sandy soil samples of different granulometric composition in order to determine its mechanical characteristics using two different methods of processing laboratory test results — taking into account the coefficient of uneven expansion of the soil sample and without it.

Results. According to the results of the performed experimental studies, it was found that the exclusion of the expansion non-linearity coefficient b from the processing of laboratory test results leads to a significant overestimation of the values of the internal friction angle. However, the values of secant modulus of deformation at 50 % strength E_{50} are lower by an average of 7.7 % when the nonlinear expansion coefficient of the steel is excluded from the processing.

Conclusions. Analyzing the results obtained, as well as taking into account various factors influencing the results of the study (density, humidity, etc.), additional laboratory tests are required in order to further clarify the correlation dependencies in determining the strength and deformation characteristics of sandy soils, with and without taking into account the coefficient b .

KEYWORDS: laboratory tests, triaxial compression, sand, strength characteristics, deformation characteristics, coefficient of uneven expansion of the soil sample under triaxial compression

FOR CITATION: Ter-Martirosyan A.Z., Anzhelo G.O., Ermoshina L.Yu., Bokov I.A., Manukyan A.V. Influence of the coefficient of non-uniform expansion of the soil sample on mechanical characteristics. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(10):1574-1586. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1574-1586 (rus.).

Corresponding author: Ilia A. Bokov, ilialia@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Для проектирования и расчетов сооружений необходимо исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового массива с последующим определением его механических (прочностных и деформационных) характеристик. Точность установления механических характеристик оказывает значительное влияние на все этапы разработки проекта.

На данный момент существует достаточно большое количество приборов различных производителей, предназначенных для определения механических характеристик грунта. Так, в лабораторных условиях испытания проводятся в приборах одноплоскостного среза (прочностные характеристики), приборах компрессионного сжатия (деформационные характеристики) и в приборах трехосного сжатия с возможностью бокового расширения образца (прочностные и деформационные характеристики). Наиболее точным из описанных выше методов определения механических характеристик грунта является испытание в приборе трехосного сжатия. Данная методика позволяет с наибольшей достоверностью среди существующих методов воспроизвести НДС грунтового массива, а соответственно наиболее точно определить механические характеристики грунта. Трехосные испытания находят применение в различных сферах: от строительства до сельского хозяйства. В этом можно убедиться, рассмотрев результаты исследований, представленные в научно-технической литературе.

Работа [1] посвящена трехосным испытаниям в крупномасштабном приборе трехосного сжатия с диаметром образцов 300 мм и высотой 600 мм. В рамках исследования формируется методика проведения испытаний в крупномасштабной установке трехосного сжатия. Большое внимание уделяется точности определяемых во время испытания характеристик, а также погрешностям, которые могут возникать в масштабе образца.

Неоднородность состава, различная степень окатанности частиц, количество и качество заполнителя в образцах не позволяют однозначно судить о механических характеристиках крупнообломочного грунта с дисперсным заполнителем. Выполнение испытаний в регионах, где использование крупнообломочного грунта обуславливается необходимостью возведения гидротехнических сооружений, зачастую невозможно в связи с трудоемкостью выполнения испытаний в поле (срез целиков), дороговизной и отсутствием приборов необходимых масштабов для исследований методом трехосного сжатия. В рамках исследования [2] трехосные испытания выполнялись на крупномасштабной установке трехосного сжатия для установления механических характеристик крупнообломочного грунта с дисперсным заполнителем с последующим составлением зависимостей, позволяющих принять расчетные характеристики в первом приближении в зависимости от ряда параметров.

В труде [3] проводится анализ коралловой глины с точки зрения геотехнических свойств. Устанавливались зависимости механических характеристик, получаемых с помощью трехосных испытаний, от химического и гранулометрического состава коралловой глины с определением содержания кораллового песка и ила в составе глины.

Были выполнены испытания в приборах трехосного сжатия по консолидированно-дренированной (КД) схеме на образцах песчаного грунта различной крупности и плотности [4]. По результатам выполненных исследований получена эмпирическая зависимость, позволяющая оценить начальный модуль деформации при имеющемся значении секущего модуля деформации.

В настоящее время многие здания и сооружения возводятся с развитой подземной частью, основанием для которых служат голубые (серые) глины. Возможное замачивание грунта основания атмосферными осадками во время строительства может вызвать изменение механических характеристик

грунта относительно принятых расчетных значений. Рассматривается влияние влажности образца глинистого грунта на его механические характеристики [5].

С целью определения механических характеристик кинетического песка в работе [6] выполнены испытания в приборах трехосного сжатия по неконсолидированно-недренированной схеме (НН), установления сопротивления недренированному сдвигу c_u и по КД, определения удельного сцепления c , угла внутреннего трения φ и модуля деформации E .

Для установления влияния температуры на изменение порового давления, а также на физические (текучесть) и механические характеристики глубоководной глины, извлеченной из Южно-Китайского моря, выполнены [7] трехосные испытания в отсутствии дренажа при различных температурах.

Определение механических характеристик грунта — необходимая процедура при моделировании НДС грунтового массива. В работе [8] рассматривается применимость использования метода прямого среза для параметризации грунтовых моделей, используемых в расчетах методами конечных элементов. Для установления возможности использования испытаний методом прямого среза результаты, полученные в срезовых приборах, сравнивают с результатами испытаний в приборах трехосного сжатия с последующим анализом.

Хорошо известно, что в образцах грунта при низком водонасыщении поверхность разрушения наиболее выражена и представляет собой характерную полосу, по которой происходит срез одной части образца относительно другой. В исследовании [9] проводятся трехосные испытания песка при низком водонасыщении с последующим рентгенографическим анализом состояния поверхности разрушения образца. С помощью рентгенографии устанавливаются вариативность локальных коэффициентов пористости, число контактов частиц песка, развитие полосы сдвига.

Поскольку дробимость частиц оказывает значительное влияние на НДС сыпучего грунта, то в связи с этим в публикации [10] с помощью трехосных испытаний определялись зависимости НДС грунтового массива сыпучего грунта от степени дробления песчаных частиц. Испытания проводились на образцах кораллового песка с различным размером частиц в дренированных и недренированных условиях. После выполнения трехосных испытаний осуществлялось повторное определение гранулометрического состава. По результатам исследований была предложена математическая модель разрушения для сыпучих грунтов с учетом дробимости и возможности повторных нагружений, при которых дробимость будет оказывать особое влияние.

Уплотнение почвы, вызванное влиянием сельскохозяйственной техники, оказывает негативное влияние на плодородность данной почвы. В тру-

де [11] для установления механических характеристик почвы, используемой в сельскохозяйственных целях, выполнены трехосные испытания по НН схеме при различной влажности образцов испытываемой почвы. По результатам исследования получены зависимости механических характеристик от влажности, а также выполнено численное моделирование.

Для установления характера взаимодействия песка и геотекстиля (при армировании песка геотекстилем) и определения коэффициентов трения на границе раздела сред в работе [12] проводились трехосные испытания на образцах песка (с угловатыми и округлыми зернами), армированного геотекстилем различных типов и свойств. Получено, что песок округлой формы с уменьшенным шагом решетки геотекстиля позволяет эффективно мобилизовать трение на границе раздела грунт — геотекстиль. Эффективность трения при испытаниях методом трехосного сжатия достигается при соотношении шага решетки геотекстиля к среднему размеру фракции 1,9.

Лабораторные исследования методом трехосного сжатия получили широкое распространение при производстве инженерно-геологических испытаний для строительства инженерных сооружений различного уровня ответственности. Проведены трехосные испытания с целью составления методических указаний по практическому применению полученных характеристик грунтового массива для геоинформационной геотехнической базы данных г. Астаны [13].

При строительстве гидротехнических сооружений из грунтовых материалов актуальным является вопрос о получении достоверных механических характеристик крупнообломочного грунта. В свою очередь такое явление, как дилатансия, напрямую связано с прочностными и деформационными свойствами грунтов. Для определения угла дилатансии крупнообломочных грунтов [14] используется крупномасштабная установка трехосного сжатия. Данные исследования легли в основу лабораторных исследований, подтверждающих выдвинутые гипотезы о связи дилатансии с механическими характеристиками грунта.

Основными показателями, влияющими на механическое поведение кварцевого песка, служат плотность, эффективное давление, структура сложения образца в природных условиях. Данные параметры обобщаются [15] единой моделью на основе лабораторных исследований в приборе трехосного сжатия.

В связи с недостаточной изученностью вопроса зависимости дилатансии от напряжений проведены испытания [16] методом трехосного сжатия при различном водонасыщении образцов грунта. Получено, что увеличение значений прочностных характеристик при частичном водонасыщении согласуется с увеличением показателей дилатансии.

Стабилизация слабых грунтов, таких как лесс, является актуальной задачей при строительстве сооружений в сложных грунтовых условиях. Выполнены испытания [17] методом трехосного сжатия с целью определения прочностных характеристик лессового грунта при различном процентном содержании альбумина.

Для определения механических характеристик грунта при различной влажности [18] проведены испытания методом трехосного сжатия по НН схеме. Экспериментальные исследования были использованы для калибровки параметров в модели дискретных элементов.

В исследовании [19] выполнено моделирование КД трехосных испытаний песчаного грунта с помощью метода трехмерных дискретных элементов. Зерна песка моделировались с помощью кластеров частиц, состоящих из жестких сфер (сфер с точками контакта). При моделировании внимание уделялось распределению частиц в образце по диаметру, диапазону размера зерен, размеру образца, граничным условиям. Результаты численного моделирования были подтверждены экспериментальными исследованиями.

С целью определения влияния методики и качества подготовки образцов из песка, включая закрепление штампа в горизонтальной плоскости, проведены трехосные КД испытания [20].

При обработке результатов лабораторных испытаний, выполненных в приборе трехосного сжатия, необходимо учитывать множество факторов, таких как: поправка на упругие свойства оболочки к вертикальному напряжению, поправка на упругие свойства оболочки к горизонтальному напряжению, также требуется определять коэффициент неравномерности расширения образца грунта при трехосном сжатии и учитывать его значение при обработке результатов испытаний. В результате анализа научной-технической литературы [1–20] выявлено, что в рассмотренных работах в процессе обработки результатов лабораторных испытаний и непосредственного определения механических характеристик образцов грунта не упоминается о влиянии коэффициента неравномерности расширения образца грунта на полученные значения прочностных и деформационных характеристик. В существующих актуальных нормативно-технических документах, таких как ГОСТ 12248.3–2020 «Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия», учет коэффициента неравномерности расширения образца грунта при трехосном сжатии b носит рекомендательный характер. Также отсутствует информация о численном влиянии коэффициента неравномерности расширения образца b на получаемые механические характеристики для различных грунтов. Поскольку данный коэффициент оказывает влияние на получаемые механические характеристики грунта, в рам-

ках данной работы выполнена серия экспериментальных исследований в приборе трехосного сжатия на образцах песчаного грунта различного гранулометрического состава с последующей обработкой результатов с целью сравнения получаемых механических характеристик с учетом и без учета коэффициента неравномерности расширения образцов грунта и установления степени влияния коэффициента неравномерности расширения b , выраженной в процентном отношении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках данной работы проведены экспериментальные исследования методом трехосного сжатия на образцах песчаного грунта различного гранулометрического состава (ИГЭ-1 — песок мелкий, ИГЭ-2 — песок средней крупности, ИГЭ-3 — песок гравелистый) с целью установления его механических характеристик с использованием двух различных методик обработки результатов лабораторных испытаний.

Первая методика заключается в определении прочностных и деформационных характеристик дисперсного грунта с учетом коэффициента неравномерности расширения образца грунта при трехосном сжатии, в соответствии с рекомендациями приложения Е ГОСТ 12248.3–2020 «Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия».

Вторая методика основана на исключении из процесса обработки результатов лабораторных испытаний данного коэффициента с последующим сравнением, полученных по двум методам результатов, и установлением в процентном эквиваленте влияния коэффициента неравномерности расширения на механические характеристики песчаного грунта.

Трехосные испытания выполнялись при полном водонасыщении по консолидированно-дренированной схеме при плотности скелета грунта $\rho_d = 1,67 \text{ г/см}^3$ (ИГЭ-1) и $\rho_d = 1,64 \text{ г/см}^3$ (ИГЭ-2, ИГЭ-3).

Величины всестороннего обжатия принимались в зависимости от глубины отбора образца и составили: 130, 230 и 330 кПа (ИГЭ-1); 100, 200 и 300 кПа (ИГЭ-2, ИГЭ-3). После завершения консолидации проводилось кинематическое нагружение со скоростью 0,5 мм/мин. Испытание осуществлялось до достижения относительными вертикальными деформациями ϵ_v значения 18 % либо до разрушения образца. Каждое испытание проводилось на новой навеске песчаного грунта.

Для выполнения трехосных испытаний применялось сертифицированное и поверенное оборудование производства ООО НПП «Геотек». Общий вид прибора трехосного сжатия представлен на рис. 1.

По результатам обработки результатов трехосных испытаний были определены следующие меха-



Рис. 1. Общий вид прибора трехосного сжатия с камерой типа А

Fig. 1. General view of a triaxial compression device with a type A chamber

нические характеристики песчаного грунта: удельное сцепление c , кПа; угол внутреннего трения φ , град.; секущий модуль деформации при 50%-ной прочности E_{50} , МПа.

Прочностные характеристики песчаного грунта определялись по следующим формулам:

$$c = \frac{M}{2\sqrt{N}}; \quad (1)$$

$$\varphi = \arctg \frac{(N-1)}{2\sqrt{N}}; \quad (2)$$

$$N = \frac{n \sum \sigma'_{1f} \sigma'_{3f} - \sum \sigma'_{1f} \sum \sigma'_{3f}}{n \sum (\sigma'_{3f})^2 - (\sum \sigma'_{3f})^2}; \quad (3)$$

$$M = \frac{\sum \sigma'_{1f} (\sum \sigma'_{3f})^2 - \sum \sigma'_{3f} \sum \sigma'_{1f} \sigma'_{3f}}{n \sum (\sigma'_{3f})^2 - (\sum \sigma'_{3f})^2}. \quad (4)$$

Значение секущего модуля деформации при 50%-ной прочности E_{50} определяется по формуле:

$$E_{50} = \frac{q_{\max}}{2(\epsilon_1)_{50}}, \quad (5)$$

где $q_{\max}$ — максимальный девиатор напряжений при разрушении образца, МПа; $(\epsilon_1)_{50}$ — значение ϵ_1 при $0,5q_{\max}$.

Девиатор напряжений q вычисляется по следующей формуле:

$$q = (\sigma_1 - \Delta\sigma_{1m}) - (\sigma_3 + \Delta\sigma_{3m}) = \frac{F - A_s \sigma_3}{A_i} 10 - \Delta\sigma_{1m} - \Delta\sigma_{3m} - \sigma_3, \quad (6)$$

где F — вертикальная нагрузка, кН; A_s — площадь поперечного сечения штока, см²; A_i — текущая площадь образца, определяемая прямым измерением или в соответствии с формулой (7); $\Delta\sigma_{1m}$ — поправка на упругие свойства оболочки к вертикальному

напряжению; $\Delta\sigma_{3m}$ — поправка на упругие свойства оболочки к горизонтальному напряжению.

Текущая площадь образца A_i для любого момента испытания определяется по формуле:

$$A_i = A \frac{1 - \epsilon_v}{1 - b \epsilon_1}, \quad (7)$$

где ϵ_v — относительная объемная деформация образца грунта; b — коэффициент нелинейности расширения грунтового образца; ϵ_1 — относительная вертикальная деформация.

Коэффициент нелинейности расширения образца грунта b при трехосных испытаниях определяется по следующей формуле:

$$b = \frac{1 - A_c/A_k}{\Delta h_k/h_c}, \quad (8)$$

где A_c — площадь поперечного сечения образца в конце этапа реконсолидации для НН испытаний и этапа консолидации для КН и КД испытаний, см²; A_k — площадь поперечного сечения в средней части образца после испытания, см²; Δh_k — полная деформация после испытания, см; h_c — высота образца в конце этапа реконсолидации для НН испытаний и этапа консолидации для КН и КД испытаний, см.

Общий вид образца песчаного грунта до и после испытания представлен на рис. 2.

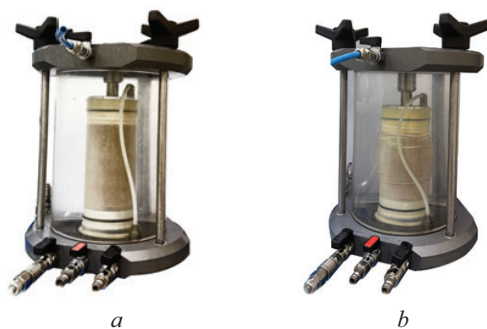


Рис. 2. Общий вид образца в камере трехосного сжатия: а — до испытания; б — после испытания

Fig. 2. General view of a sample in the triaxial compression chamber: a — before the test; b — after the test

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам выполненных трехосных испытаний построены графики зависимости относительных вертикальных деформаций от вертикального напряжения (рис. 3–5), также построены паспорта прочности (рис. 6–11) для каждого из трех видов песчаного грунта (ИГЭ-1, ИГЭ-2, ИГЭ-3). В табл. 1–6 представлены результаты обработки испытаний песчаного грунта по двум методикам. В табл. 7, 8 приведена сравнительная характеристика результатов

Табл. 1. Результаты испытаний для ИГЭ-1 по двум методикам

Table 1. Test results for IGE-1 using two methods

С учетом коэффициента b With coefficient b			Без учета коэффициента b Without coefficient b		
σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	E_{50} , кПа kPa	σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	E_{50} , кПа kPa
0,130	0,473	15,95	0,130	0,514	15,04

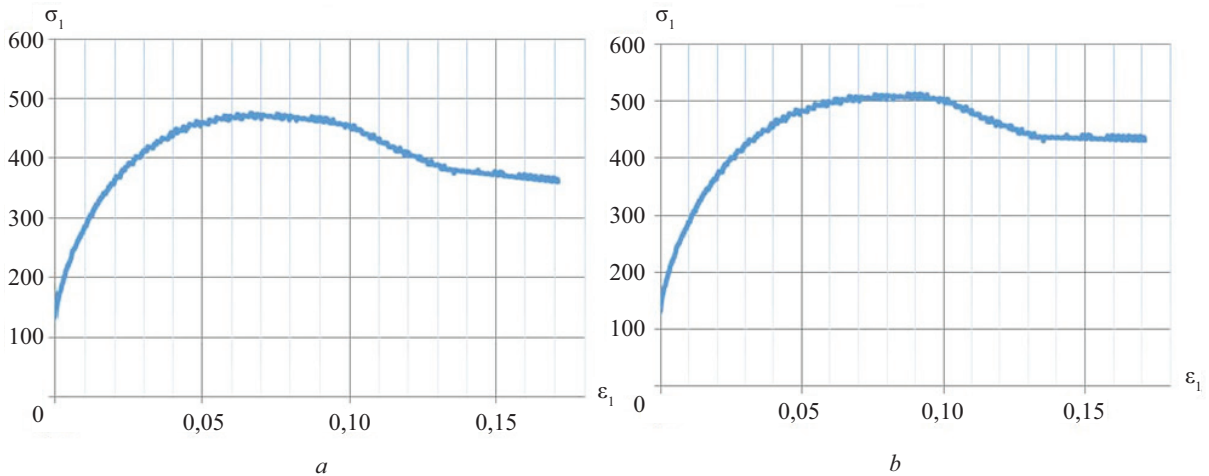


Рис. 3. График зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ_1 от вертикальных напряжений σ_1 для ИГЭ-1: a — с учетом коэффициента нелинейности расширения b ; b — без учета коэффициента нелинейности расширения b

Fig. 3. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ_1 on vertical stresses σ_1 for IGE-1: a — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b

Табл. 2. Результаты испытаний для ИГЭ-2 по двум методикам

Table 2. Test results for IGE-2 by two methods

С учетом коэффициента b With coefficient b			Без учета коэффициента b Without coefficient b		
σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	E_{50} , кПа kPa	σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	E_{50} , кПа kPa
0,100	0,368	15,50	0,100	0,406	14,36

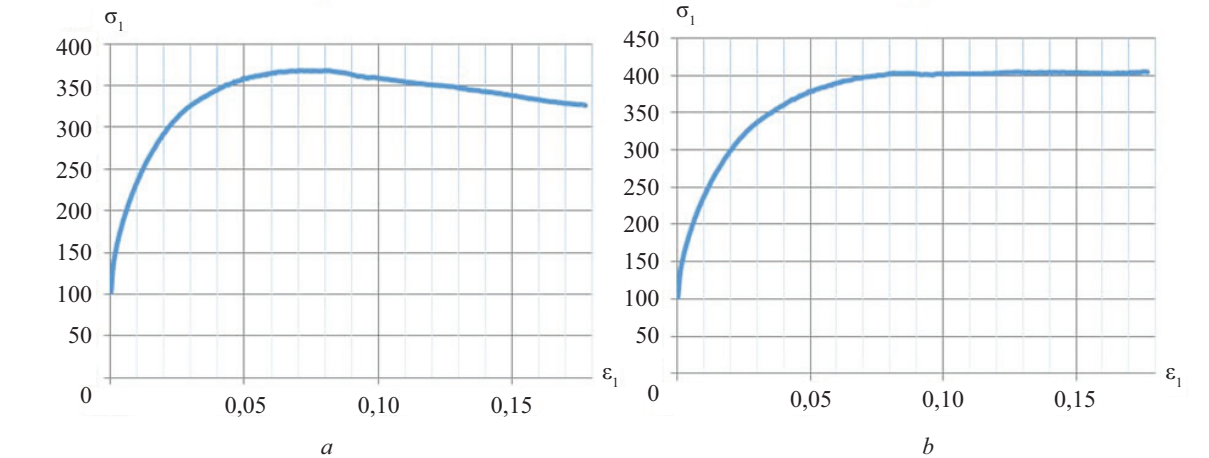


Рис. 4. График зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ_1 от вертикальных напряжений σ_1 для ИГЭ-2: a — с учетом коэффициента нелинейности расширения b ; b — без учета коэффициента нелинейности расширения b

Fig. 4. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ_1 on vertical stresses σ_1 for IGE-2: a — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b

Табл. 3. Результаты испытаний для ИГЭ-3 по двум методикам

Table 3. Test results for IGE-3 by two methods

С учетом коэффициента b With coefficient b			Без учета коэффициента b Without coefficient b		
σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	E_{50} , кПа kPa	σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	E_{50} , кПа kPa
0,100	0,351	6,24	0,100	0,442	5,81

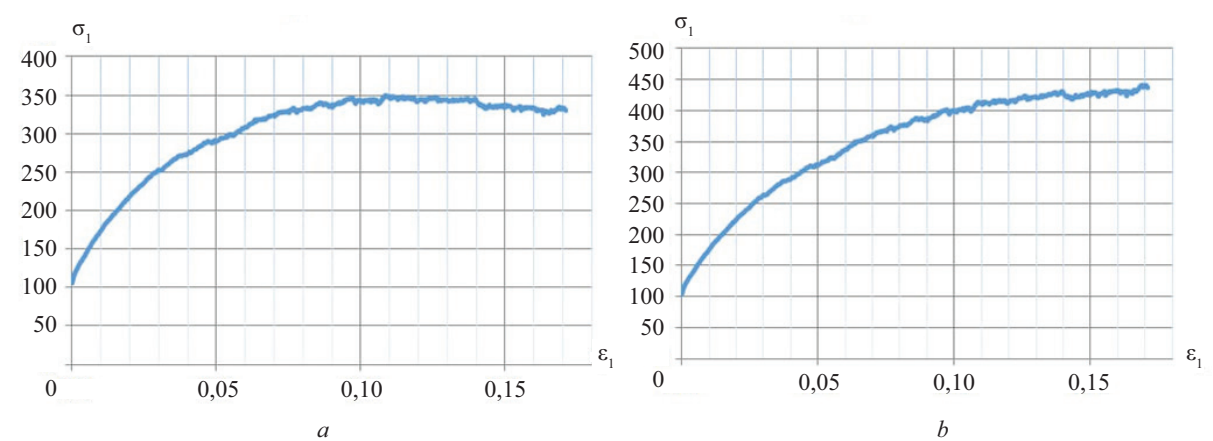


Рис. 5. График зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ_1 от вертикальных напряжений σ_1 для ИГЭ-3: a — с учетом коэффициента нелинейности расширения b ; b — без учета коэффициента нелинейности расширения b
Fig. 5. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ_1 on vertical stresses σ_1 for IGE-3: a — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b

Табл. 4. Результаты испытаний для ИГЭ-1 по двум методикам

Table 4. Test results for IGE-1 using two methods

Без учета коэффициента b Without coefficient b				С учетом коэффициента b With coefficient b			
σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	φ°	C , кПа kPa	σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	φ°	C , кПа kPa
0,130	0,514	37,2	0	0,130	0,477	34,5	0,34
0,230	0,897			0,230	0,817		
0,330	1,368			0,330	1,198		

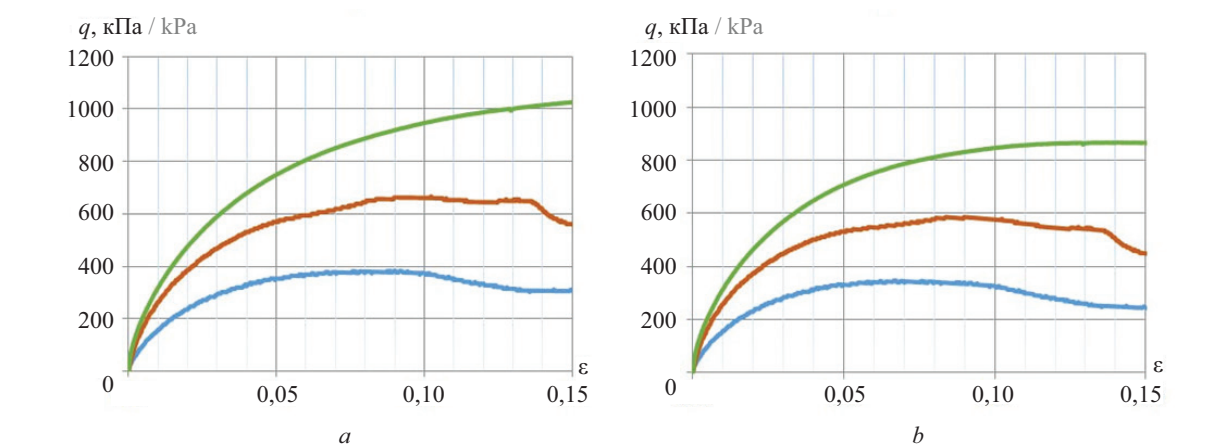


Рис. 6. График зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ от девиатора напряжений q для ИГЭ-1: a — без учета коэффициента нелинейности расширения b ; b — с учетом коэффициента нелинейности расширения b
Fig. 6. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ on the stress deviator q for IGE-1: a — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — taking into account the coefficient of nonlinearity of the expansion b

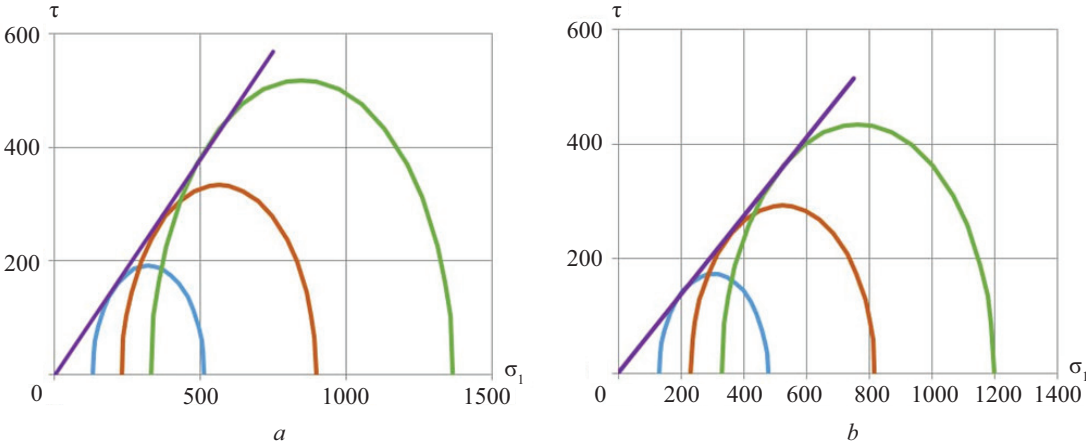


Рис. 7. Диаграмма Кулона – Мора для ИГЭ-1: *a* — без учета коэффициента нелинейности расширения *b*; *b* — с учетом коэффициента нелинейности расширения *b*
Fig. 7. Coulomb – Mohr diagram for IGE-1: *a* — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion *b*; *b* — taking into account the coefficient of nonlinearity of the expansion *b*

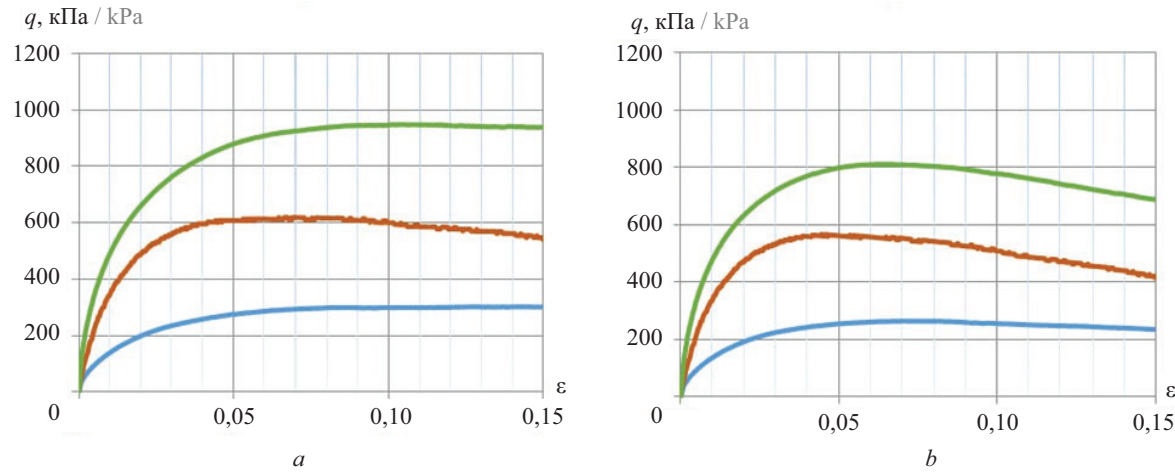


Рис. 8. График зависимости относительных вертикальных деформаций ε от девиатора напряжений q для ИГЭ-2: *a* — без учета коэффициента нелинейности расширения *b*; *b* — с учетом коэффициента нелинейности расширения *b*
Fig. 8. Graph of the dependence of relative vertical deformations ε on the stress deviator q for IGE-2: *a* — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion *b*; *b* — taking into account the coefficient of nonlinearity of the expansion *b*

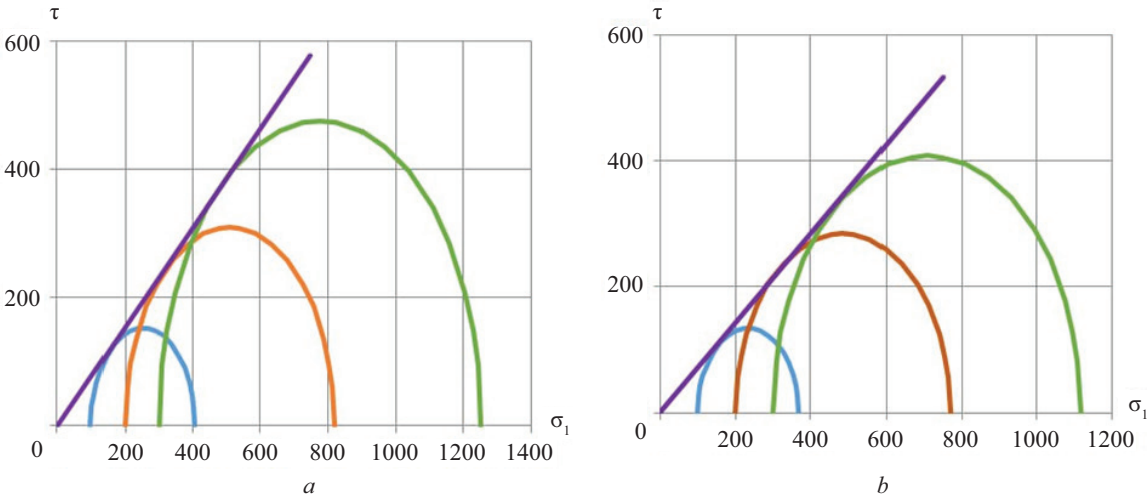


Рис. 9. Диаграмма Кулона – Мора для ИГЭ-2: *a* — без учета коэффициента нелинейности расширения *b*; *b* — с учетом коэффициента нелинейности расширения *b*
Fig. 9. Coulomb – Mohr diagram for IGE-2: *a* — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion *b*; *b* — taking into account the coefficient of nonlinearity of the expansion *b*

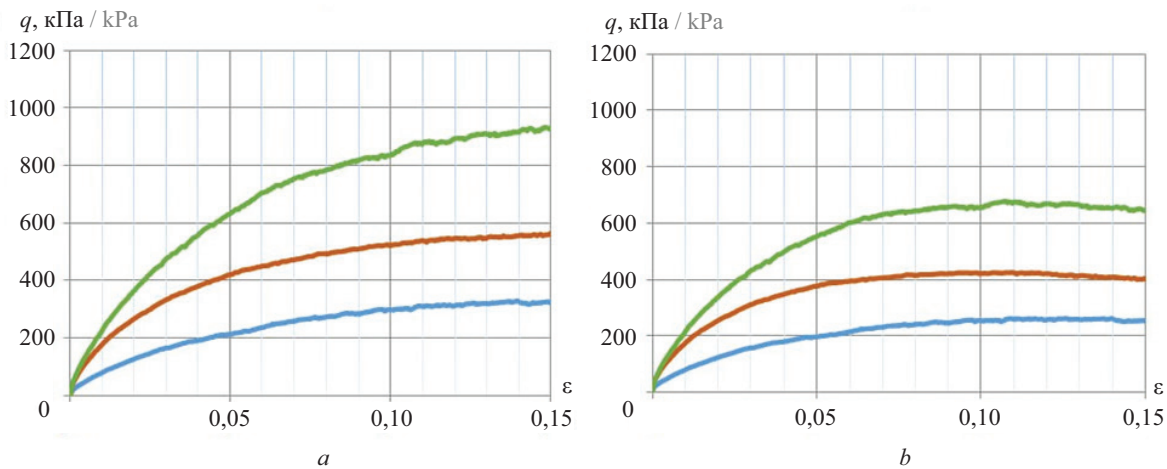


Рис. 10. График зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ от девиатора напряжений q для ИГЭ-3: a — без учета коэффициента нелинейности расширения b ; b — с учетом коэффициента нелинейности расширения b

Fig. 10. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ on the stress deviator q for IGE-3: a — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — taking into account the coefficient of nonlinearity of the expansion b

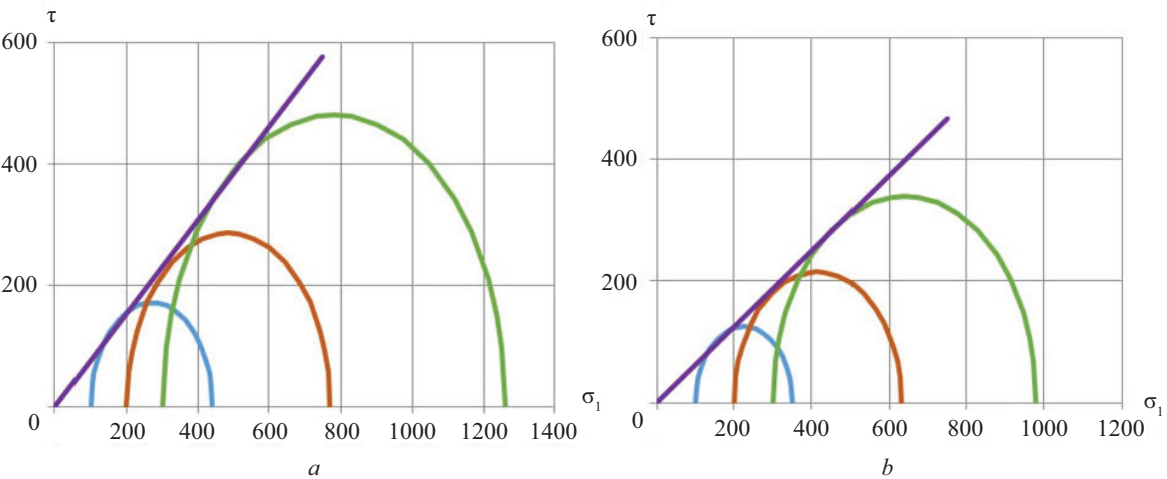


Рис. 11. Диаграмма Кулона – Мора для ИГЭ-3: a — без учета коэффициента нелинейности расширения b ; b — с учетом коэффициента нелинейности расширения b

Fig. 11. Coulomb – Mohr diagrams for IGE-3: a — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — taking into account the coefficient of nonlinearity of the expansion b

Табл. 5. Результаты испытаний для ИГЭ-2 по двум методикам

Без учета коэффициента b Without coefficient b				С учетом коэффициента b With coefficient b			
σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	φ°	C , кПа kPa	σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	φ°	C , кПа kPa
0,100	0,406	37,7	0	0,100	0,368	35,3	0,8
0,200	0,820			0,200	0,769		
0,300	1,252			0,300	1,116		

Табл. 6. Результаты испытаний для ИГЭ-3 по двум методикам

Table 6. Test results for IGE-3 using two methods

Без учета коэффициента b Without coefficient b				С учетом коэффициента b With coefficient b			
σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	φ°	C , кПа kPa	σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	φ°	C , кПа kPa
0,100	0,442	37,6	0	0,100	0,351	32,0	0
0,200	0,772			0,200	0,631		
0,300	1,262			0,300	0,981		

Табл. 7. Прочностные характеристики песчаного грунта

Table 7. Strength characteristics of sandy soil

ИГЭ IGE	Тип, согласно гранулометрическому составу Type, according to particle size distribution	Угол внутреннего трения φ° Internal friction angle φ°		Удельное сцепление c , кПа Specific cohesion c , kPa	
		с учетом коэффициента b with coefficient b	без учета коэффициента b without coefficient b	с учетом коэффициента b with coefficient b	без учета коэффициента b without coefficient b
ИГЭ-1 IGE-1	Песок мелкий Fine sand	34,5	37,2	0,34	0
ИГЭ-2 IGE-2	Песок средней крупности Medium-sized sand	35,3	37,7	0,8	0
ИГЭ-3 IGE-3	Песок гравелистый Gravel sand	32,0	37,6	0	0

Табл. 8. Деформационные характеристики песчаного грунта

Table 8. Deformation characteristics of sandy soil

ИГЭ IGE	Тип, согласно гранулометрическому составу Type, according to particle size distribution	Секущий модуль деформации при 50%-ной прочности E_{50} , кПа Secant modulus of deformation at 50 % strength E_{50} , kPa	
		с учетом коэффициента b with coefficient b	без учета коэффициента b without coefficient b
ИГЭ-1 IGE-1	Песок мелкий Fine sand	15,77	15,04
ИГЭ-2 IGE-2	Песок средней крупности Medium-sized sand	15,50	14,36
ИГЭ-3 IGE-3	Песок гравелистый Gravel sand	6,24	5,81

трехосных испытаний, полученных путем обработки по двум методикам для каждого ИГЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных экспериментальных исследований можно сделать следующие основные выводы.

Исключение из процесса обработки результатов лабораторных испытаний коэффициента нелинейности расширения b приводит к существенному завышению значений угла внутреннего трения, а именно: для ИГЭ-1 (песок мелкий) — на 8 %, для ИГЭ-2 (песок средней крупности) — на 7 %, для ИГЭ-3 (песок гравелистый) — на 18 %, которое может ока-

зать непосредственное влияние при выборе и обосновании проектных решений.

Необходимо отметить, что значения секущего модуля деформации при 50%-ной прочности E_{50} при исключении из процесса обработки коэффициента нелинейности расширения стали ниже в среднем на 7,7 %, а именно: для ИГЭ-1 (песок мелкий) — на 6,4 %, для ИГЭ-2 (песок средней крупности) — на 7,5 %, для ИГЭ-3 (песок гравелистый) — на 9,2 %.

В частности, наибольшее влияние в процентном эквиваленте на получаемые в результате обработки трехосных испытаний прочностные характеристики песчаного грунта коэффициент b оказывает в случае, когда испытания проводятся на гравелистых песках.

Анализируя полученные результаты, а также учитывая различные факторы, влияющие на результаты исследования (плотность, влажность и т.д.), требуется проведение дополнительных лабораторных

испытаний с целью дальнейшего уточнения корреляционных зависимостей при определении прочностных и деформационных характеристик песчаных грунтов с учетом и без учета коэффициента b .

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мирный А.Ю., Тер-Мартirosян А.З. Определение механических характеристик крупнообломочных грунтов прямыми испытаниями в трехосном приборе // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сб. мат. Междунар. науч. конф. 2017. С. 937–941. EDN XSNIQV.

2. Ишмаев О.А., Филимонова Н.В. Результаты трехосных испытаний песков гравелистых в комплексе «АСИС» с диаметром образцов 100 мм // Известия Уральского государственного горного университета. 2022. № 2 (66). С. 89–95. DOI: 10.21440/2307-2091-2022-2-89-95 EDN XNCBJY.

3. Jiang C., Ding X., Chen X., Fang H., Zhang Y. Laboratory study on geotechnical characteristics of marine coral clay // Journal of Central South University. 2022. Vol. 29. Issue 2. Pp. 572–581. DOI: 10.1007/s11771-022-4900-5

4. Шулятьев О.А., Исаев О.Н., Шарафутдинов Р.Ф., Морозов В.С., Закатов Д.С. Лабораторные исследования влияния напряженного состояния на деформационные характеристики песчаных грунтов // Вестник НИЦ «Строительство». 2019. № 20 (1). С. 140–154. EDN YVTYXZ.

5. Королева И.В., Сагдатова М.Р. Экспериментальные исследования поведения серых глин в условиях трехосного сжатия при разной влажности // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 4 (50). С. 228–235. EDN EUGJOR.

6. Мамаева А.А., Клевеко В.И. Исследование характеристик кинетического песка с помощью установки трехосного сжатия // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2021. Т. 2. С. 48–54. EDN DZBZQE.

7. Sun A., Yang G., Yang Q., Qi M., Wang N., Ren Y. Experimental investigation of thermo-mechanical behaviors of deep-sea clay from the South China Sea // Applied Ocean Research. 2022. Vol. 119. P. 103015. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103015

8. Steidel S., Jahnke J., Chang X., Becker A., Vrettos C. Triaxial compression and direct shear tests in the parametrization of soil modeled via the discrete element method // 7th edition of the International Conference on Particle-based Methods. 2021. DOI: 10.23967/particles.2021.013

9. Kido R., Higo Y. Distribution changes of grain contacts and menisci in shear band during triaxial compression test for unsaturated sand // Japanese Geotech-

nical Society Special Publication. 2019. Vol. 7. Issue 2. Pp. 627–635. DOI: 10.3208/jgssp.v07.096

10. Wang G., Wang Z., Ye Q., Zha J. Particle breakage evolution of coral sand using triaxial compression tests // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2021. Vol. 13. Issue 2. Pp. 321–334. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.06.010

11. Hernández-Hernández V.A., Joya-Cárdenas D.R., Equihua-Anguiano L.N., Leal-Vaca J.C., Diosdado-De la Peña J.A., Pérez-Moreno L. et al. Experimental and numerical analysis of triaxial compression test for a clay soil // Chilean Journal of Agricultural Research. 2021. Vol. 81. Issue 3. Pp. 357–367. DOI: 10.4067/S0718-58392021000300357

12. Markou I.N. A study on Geotextile — Sand interface behavior based on direct shear and triaxial compression tests // International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering. 2018. Vol. 4. Issue 1. DOI: 10.1007/s40891-017-0121-7

13. Tulebekova A., Zhussupbekov A., Zhumadilov I., Bukenbaeva D., Drozdova I. Laboratory tests of soils on triaxial compression apparatus // 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2020. Vol. 2019. Pp. 45–56.

14. Du J., Qiu Z. Experimental research on dilatancy characteristics of coarse-grained soils by triaxial compression test // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2011. Issue 1. P. 012067. DOI: 10.1088/1742-6596/2011/1/012067

15. Fern J., Soga K., Sakanoue T. Modelling the shear strength and dilatancy of dry sand in triaxial compression tests // Geomechanics from Micro to Macro. 2014. Pp. 673–678. DOI: 10.1201/b17395-120

16. Fern E.J., Robert D.J., Soga K. Modeling the stress-dilatancy relationship of unsaturated silica sand in triaxial compression tests // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2016. Vol. 142. Issue 11. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001546

17. Zarei C., Wang F., Qiu P., Fang P., Liu Y. Laboratory investigations on geotechnical characteristics of albumen treated loess soil // KSCE Journal of Civil Engineering. 2022. Vol. 26. Issue 2. Pp. 539–549. DOI: 10.1007/s12205-021-1723-0

18. Nandanwar M.R., Chen Y. Simulations of triaxial compression test for sandy loam soil using PFC3D // 2014 ASABE Annual International Meeting. 2014. DOI: 10.13031/aim.20141911030

19. Kozicki J., Tejchman J., Mühlhaus H. Discrete simulations of a triaxial compression test for sand by DEM // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2014. Vol. 38. Issue 18. Pp. 1923–1952. DOI: 10.1002/nag.2285

20. Mozaffari M., Liu W., Ghafghazi M. Influence of specimen nonuniformity and end restraint conditions on drained triaxial compression test results in sand // *Canadian Geotechnical Journal*. 2022. Vol. 59. Issue 8. Pp. 1414–1426. DOI: 10.1139/cgj-2021-0505

Поступила в редакцию 20 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 23 июня 2023 г.

Одобрена для публикации 30 июля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Армен Завенович Тер-Мартirosян** — доктор технических наук, профессор, проректор, руководитель научно-образовательного центра «Геотехника»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9467-5034, ORCID: 0000-0001-8787-826X, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017; gic-mgsu@mail.ru;

Георгий Олегович Анжело — кандидат технических наук; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; nocgeo@mail.ru;

Любовь Юрьевна Ермошина — аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; lyubov.ermoshina1801@mail.ru;

Илья Алексеевич Боков — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; iliililia@yandex.ru;

Артур Ванушевич Манукян — доктор технических наук; **Концерн МонАрх**; 125284, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 31А, стр. 1; a.manukyan@mon-arch.ru.

Вклад авторов:

Тер-Мартirosян А.З. — научное руководство.

Анжело Г.О. — концепция исследования, развитие методологии, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Ермошина Л.Ю. — концепция исследования, развитие методологии, написание статьи, обработка результатов испытаний, итоговые выводы.

Боков И.А. — проведение лабораторных испытаний, написание статьи, обработка результатов испытаний, доработка текста.

Манукян А.В. — научное руководство.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Mirny A.Yu., Ter-Martirosyan A.Z. Determination of the mechanical characteristics of coarse-elastic soils by direct tests in a three-axis device. *Integration, partnership and innovation in construction science and education : collection of materials of international scientific conference*. 2017; 937-941. EDN XSNIQV. (rus.).

2. Ishmaev O.A., Filimonova N.V. Results of three-axis tests of gravel sands in the complex “ASIS PRO” with a sample diameter of 100 mm. *Bulletin of the Ural State Mining University*. 2022; 2(66):89-95. DOI: 10.21440/2307-2091-2022-2-89-95. EDN XNCBJY. (rus.).

3. Jiang C., Ding X., Chen X., Fang H., Zhang Y. Laboratory study on geotechnical characteristics of marine coral clay. *Journal of Central South University*. 2022; 29(2):572-581. DOI: 10.1007/s11771-022-4900-5

4. Shuljatjev O., Isaev O., Sharafutdinov R., Morosov V., Zakatov D. Laboratory studies of a stress state effect on sand deformation characteristics. *Bulletin*

of Science and Research Center of Construction. 2019; 20(1):140-154. EDN YVTYXZ. (rus.).

5. Koroleva I.V., Sagdatova M.R. Experimental studies of gray clay behavior under conditions of triaxial compression at different moisture. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2019; 4(50):228-235. EDN EUGJOR. (rus.).

6. Mamaeva A.A., Kleveko V.I. Properties research of kinetic sand by use of stabilometer. *Modern Technologies in Construction. Theory and Practice*. 2021; 2:48-54. EDN DZBZQE. (rus.).

7. Sun A., Yang G., Yang Q., Qi M., Wang N., Ren Y. Experimental investigation of thermo-mechanical behaviors of deep-sea clay from the South China Sea. *Applied Ocean Research*. 2022; 119:103015. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103015

8. Steidel S., Jahnke J., Chang X., Becker A., Vrettos C. Triaxial compression and direct shear tests

in the parametrization of soil modeled via the discrete element method. *7th edition of the International Conference on Particle-based Methods*. 2021. DOI: 10.23967/particles.2021.013

9. Kido R., Higo Y. Distribution changes of grain contacts and menisci in shear band during triaxial compression test for unsaturated sand. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. 2019; 7(2):627-635. DOI: 10.3208/jgsssp.v07.096

10. Wang G., Wang Z., Ye Q., Zha J. Particle breakage evolution of coral sand using triaxial compression tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021; 13(2):321-334. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.06.010

11. Hernández-Hernández V.A., Joya-Cárdenas D.R., Equihua-Anguiano L.N., Leal-Vaca J.C., Diosdado-De la Peña J.A., Pérez-Moreno L. et al. Experimental and numerical analysis of triaxial compression test for a clay soil. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2021; 81(3):357-367. DOI: 10.4067/S0718-58392021000300357

12. Markou I.N. A study on geotextile — Sand interface behavior based on direct shear and triaxial compression tests. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2018; 4(1). DOI: 10.1007/s40891-017-0121-7

13. Tulebekova A., Zhussupbekov A., Zhumadilov I., Bukenbaeva D., Drozdova I. Laboratory tests of soils on triaxial compression apparatus. *16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2020; 2019:45-56.

14. Du J., Qiu Z. Experimental research on dilatancy characteristics of coarse-grained soils by tri-

axial compression test. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 2011(1):012067. DOI: 10.1088/1742-6596/2011/1/012067

15. Fern J., Soga K., Sakanoue T. Modelling the shear strength and dilatancy of dry sand in triaxial compression tests. *Geomechanics from Micro to Macro*. 2014; 673-678. DOI: 10.1201/b17395-120

16. Fern E.J., Robert D.J., Soga K. Modeling the stress-dilatancy relationship of unsaturated silica sand in triaxial compression tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2016; 142(11). DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001546

17. Zarei C., Wang F., Qiu P., Fang P., Liu Y. Laboratory investigations on geotechnical characteristics of alumen treated loess soil. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2022; 26(2):539-549. DOI: 10.1007/s12205-021-1723-0

18. Nandanwar M.R., Chen Y. Simulations of triaxial compression test for sandy loam soil using PFC3D. *2014 ASABE Annual International Meeting*. 2014. DOI: 10.13031/aim.20141911030

19. Kozicki J., Tejchman J., Mühlhaus H. Discrete simulations of a triaxial compression test for sand by DEM. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2014; 38(18):1923-1952. DOI: 10.1002/nag.2285

20. Mozaffari M., Liu W., Ghafghazi M. Influence of specimen nonuniformity and end restraint conditions on drained triaxial compression test results in sand. *Canadian Geotechnical Journal*. 2022; 59(8):1414-1426. DOI: 10.1139/cgj-2021-0505

Received June 20, 2023.

Adopted in revised form on June 23, 2023.

Approved for publication on July 30, 2023.

BIONOTES: Armen Z. Ter-Martirosyan — Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9467-5304, ORCID: 0000-0001-8787-826X, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017; gic-mgsu@mail.ru;

Georgiy O. Anzhelo — Candidate of Technical Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; nocgeo@mail.ru;

Lyubov Yu. Ermoshina — postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; lyubov.ermoshina1801@mail.ru;

Ilia A. Bokov — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; iliililia@yandex.ru;

Artur V. Manukyan — Doctor of Technical Sciences; **Concern MonArch**; build. 1, 31A Leningradsky prospect, Moscow, 125284, Russian Federation; a.manukyan@mon-arch.ru.

Authors' contribution:

Armen Z. Ter-Martirosyan — scientific guidance.

Georgiy O. Anzhelo — research concept, methodology development, scientific text editing, final conclusions.

Lyubov Yu. Ermoshina — research concept, methodology development, article writing, test results processing, final conclusions.

Ilia A. Bokov — laboratory testing, writing an article, processing test results, revision of the text.

Artur V. Manukyan — scientific guide.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.074.1

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1587-1598

Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в пятислойных плитах древесины перекрестно-клееной

Михаил Юрьевич Трошин, Андрей Викторович Турков

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева (ОГУ им. И.С. Тургенева);
г. Орел, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Отличительной чертой древесины перекрестно-клееной (ДПК, CLT-панелей) является перекрестное расположение досок (ламелей) в разных слоях плиты. Ввиду анизотропии древесины такая конструкция позволяет добиться высокой прочности и жесткости в разных направлениях действия напряжений, что сделало данный материал одним из самых перспективных для изучения в последние десятилетия. Рассматривается влияние толщины поперечных и продольных слоев в пятислойных плитах из ДПК на деформации и распределение возникающих нормальных и касательных напряжений. Актуальность обусловлена необходимостью получения расчетных данных для анализа изменения прочностных характеристик плит при различных вариациях толщины продольных и поперечных слоев с целью выбора наиболее эффективной конфигурации плиты.

Материалы и методы. Исследования проведены численными методами при помощи ПК SCAD+ с помощью МКЭ (метода конечных элементов). При этом объемными конечными элементами являются параллелепипеды. Расчетная схема определена как система общего вида, деформации которой и ее основные неизвестные представлены линейными перемещениями узловых точек вдоль осей X, Y, Z и поворотами вокруг этих осей. В качестве расчетной конструкции выбрана пятислойная плита с перекрестно направленными слоями таким образом, что наружные (1, 5) и центральный внутренние (3) слои являются продольными, а оставшиеся внутренние (2, 4) — поперечными. Упрощенная расчетная схема представляет собой шарнирно опертую балку.

Результаты. По результатам исследования и произведенных расчетов в SCAD+ составлены таблицы, на основании которых построены графики, отражающие зависимость прогиба, распределения нормальных и тангенциальных напряжений от толщины поперечных и продольных слоев плиты.

Выводы. Полученные данные позволяют оценить влияние толщины на деформативность и распределение напряжений в пятислойных CLT-панелях. Значимость выполненных исследований заключается в расширении научно-технической базы знаний в области деревянных конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: деревянные конструкции, CLT-панели, древесина, многослойные материалы, напряжения, прогиб, механические свойства, метод конечных элементов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Трошин М.Ю., Турков А.В. Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в пятислойных плитах древесины перекрестно-клееной // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 10. С. 1587–1598. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1587-1598

Автор, ответственный за переписку: Михаил Юрьевич Трошин, mtr997@mail.ru.

Influence of thickness of transverse and longitudinal layers on deformability and stress distribution in five-layer cross-glued wood boards

Mikhail Yu. Troshin, Andrej V. Turkov

Orel State University named after I.S. Turgenev (Orel State University); Orel, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A distinctive feature of CLT panels is the cross arrangement of planks (lamellae) in different layers of the board. Due to the anisotropy of wood, this design allows for high strength and stiffness in different directions of stress action, which has made this material one of the most promising to be studied in recent decades. This article examines the influence of the thickness of transverse and longitudinal layers in five-layer slabs of cross-glued timber boards, or CLT panels, on the deformation and distribution of the resulting normal and tangential stresses. The relevance of the work is conditioned by the necessity of obtaining calculated data to analyze changes in the strength characteristics of boards with different variations in the thickness of longitudinal and transverse layers in order to choose the most effective configuration of the board.

Materials and methods. The studies were carried out by numerical methods using SCAD+ PC using FEM (Finite element method). At the same time, the three-dimensional finite elements are parallelepipeds. The design scheme is defined as

a general-type system, whose deformations and its main unknowns are represented by linear displacements of nodal points along the X , Y , Z axes and rotations around these axes. As a design structure, a five-layer slab with cross-directed layers was chosen in such a way that the outer (1, 5) and central inner (3) layers are longitudinal, and the remaining inner (2, 4) are transverse. The simplified design scheme is a pivotally supported beam.

Results. The results of the study and calculations made using SCAD+ were applied to make tables and graphs showing dependence of deflection, distribution of normal and tangential stresses on the thickness of transverse and longitudinal layers of the board.

Conclusions. The obtained data allow us to evaluate the influence of thickness on deformability and stress distribution in five-layer CLT panels. The significance of the conducted research is in the expansion of scientific and technical knowledge base in the field of wooden structures.

KEYWORDS: wooden structures, CLT panels, wood, multilayer materials, stresses, deflection, mechanical properties, finite-element method

FOR CITATION: Troshin M.Yu., Turkov A.V. Influence of thickness of transverse and longitudinal layers on deformability and stress distribution in five-layer cross-glued wood boards. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(10):1587-1598. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1587-1598 (rus.).

Corresponding author: Mikhail Yu. Troshin, mtr997@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия древесина перекрестно-клееная (ДПК, CLT-панели) стала одним из самых перспективных материалов в современной строительной индустрии. Уникальные механические свойства CLT-панелей и широкий спектр применения привлекают все большее внимание исследователей, инженеров и архитекторов.

Изучение механических свойств CLT-панелей играет важную роль в понимании и оценке их производственных и конструктивных характеристик. Механические свойства определяют прочность, устойчивость и деформационные характеристики материала, что влияет на его способность противостоять нагрузкам, а также на долговечность конструкций.

Ранее авторами проводились исследования трехслойных плит из ДПК [1]. Кроме того, изучением механических свойств плит из ДПК при разных условиях занимались как зарубежные [2–9], так и отечественные авторы [10–20].

В статье представлены результаты расчета, проведенного на моделях пятислойных плит древесины

перекрестно-клееной, или CLT-панелей, с различной толщиной поперечных и продольных слоев. Были измерены деформации и напряжения во множестве конечных элементов (КЭ) и узлов. Для анализа взяты максимальные значения деформаций и напряжений в узлах КЭ для каждой вариации плиты.

Цель исследования — выявление влияния толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в пятислойных плитах ДПК. Полученные результаты могут быть полезными для оптимизации проектирования и производства CLT-панелей, а также для повышения их механической прочности и устойчивости к деформациям.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проведены численными методами при помощи программно-вычислительного комплекса SCAD+. Расчетная схема определена как система общего вида, деформации которой и ее основные неизвестные представлены линейными перемещениями узловых точек вдоль осей X , Y , Z и поворотами вокруг этих осей.

Расчетная конструкция — пятислойная плита из ДПК, шарнирно опертая на опорах. Пространственная модель показана на рис. 1.

Плиты закреплены по нижнему слою с двух противоположных сторон пластин по направлению XZ и XYZ (шарнирно-подвижная и шарнирно-неподвижная опоры). Нагружение плиты из пере-

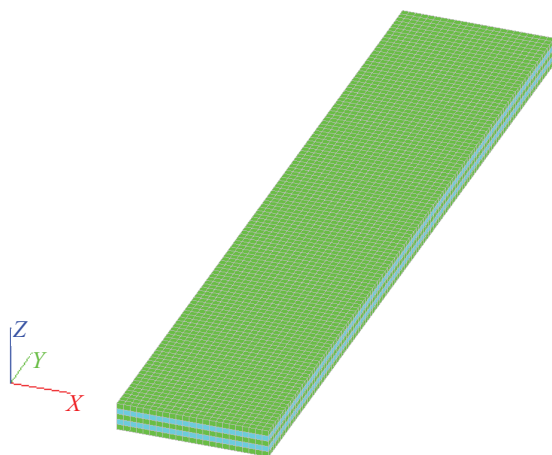


Рис. 1. Общий вид расчетной модели пятислойной плиты из ДПК

Fig. 1. General view of the calculation model of a five-layer CLT board

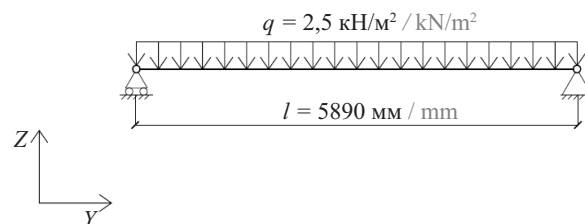


Рис. 2. Расчетная схема пятислойной плиты из перекрестной древесины

Fig. 2. Design scheme of a five-layer CLT board

крестной древесины задается равномерно распределенной нагрузкой на грани объемных элементов, равной 2,5 кН/м². Длина конструкции — 5890 мм, ширина — 1140 мм. Ламели в слоях имеют ширину 190 мм и варьируемую толщину 9; 12; 18; 25; 32; 42 мм. Ламели расположены так, что в первом, третьем и пятом слоях они направлены вдоль плиты, а во втором и четвертом слоях — поперек. Упрощенная плоская расчетная схема представляет собой статически определимую балку (рис. 2).

Программный комплекс (ПК) SCAD+ позволяет определять механические свойства за счет присвоения расчетной модели параметров, соответствующих реальному материалу. Учитывая анизотропные свойства древесины, поперечным и продольным слоям были заданы разные модули упругости вдоль *OX* и *OY*. Упругие характеристики, присвоенные КЭ в соответствии с нормативом¹ для расчета в SCAD+, представлены в табл. 1, 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выявления основных зависимостей деформаций и напряжений от изменения толщины в продольном и поперечном направлениях были построены модели пятислойных плит из ДПК с различной толщиной продольных слоев (1, 3, 5), составляющих 9, 12, 18, 25,

¹ СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции.

Табл. 1. Упругие характеристики ортотропных элементов в продольном направлении
Table 1. Elastic characteristics of orthotropic elements in the longitudinal direction

Модуль упругости, Т/м² / Modulus of elasticity, T/m²					
E_x		E_y		E_z	
40 789		1 019 716		40 789	
Модуль сдвига, Т/м² / Shear modulus, T/m²					
G_{xy}		G_{xz}		G_{yz}	
50 986		50 986		50 986	
Коэффициент Пуассона / Poisson's ratio					
ν_{xy}	ν_{yx}	ν_{xz}	ν_{zx}	ν_{yz}	ν_{zy}
0,45	0,018	0,45	0,018	0,018	0,018

Табл. 2. Упругие характеристики ортотропных элементов в поперечном направлении
Table 2. Elastic characteristics of orthotropic elements in the transverse direction

Модуль упругости, Т/м² / Modulus of elasticity, T/m²					
E_x		E_y		E_z	
1 019 716		40 789		40 789	
Модуль сдвига, Т/м² / Shear modulus, T/m²					
G_{xy}		G_{xz}		G_{yz}	
50 986		50 986		50 986	
Коэффициент Пуассона / Poisson's ratio					
ν_{xy}	ν_{yx}	ν_{xz}	ν_{zx}	ν_{yz}	ν_{zy}
0,018	0,45	0,018	0,018	0,45	0,018

32 и 42 мм; и с различной толщиной поперечных слоев (2, 4), составляющих 9, 12, 18, 25, 32 и 42 мм.

По результатам проведенного линейного расчета моделей в ПК SCAD+ получены числовые значения деформаций узлов и напряжений в КЭ, отображены максимальные их значения для каждой плиты соответственно. Впоследствии данные систематизированы и внесены в табл. 3.

На основе полученных результатов построены линейные графики зависимостей вычисляемых параметров от толщины продольных слоев, отображенные на рис. 3–5.

Повторный расчет выполнен для моделей с изменяемой толщиной поперечных слоев. Полученные значения занесены в табл. 4, и построены графики (рис. 6–8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам расчета при действии статической равномерно распределенной нагрузки выявлено, что:

- при уменьшении толщины досок в продольных слоях прогиб возрастает на ~84 %, а при уменьшении толщины досок в поперечных слоях — на ~39 %. Такая значительная разница указывает на то, что в плитах ДПК наибольшее влияние на жесткость конструкции оказывают продольные наружные слои;

Табл. 3. Пятислойная панель с продольным расположением досок в наружных слоях с варьируемой толщиной продольных слоев

Table 3. A five-layer CLT panel with longitudinal arrangement of boards in outer layers with variable thickness of longitudinal layers

Номер слоев Number layers	Толщина продольных слоев, мм Thickness of longitudinal layers, mm	Толщина поперечных слоев, мм Thickness of transverse layers, mm	u , мм / mm	N_x , кН/м ² kN/m ²	N_y , кН/м ² kN/m ²	N_z , кН/м ² kN/m ²	τ_{xy} , кН/м ² kN/m ²	τ_{xz} , кН/м ² kN/m ²	τ_{yz} , кН/м ² kN/m ²
1, 5	9	42	106,1	-219,2	-15 267,1	-265,2	-12,2	-20,9	-128,3
	12	42	72,3	-156,9	-11 008,3	-258,9	-10,1	-19,5	-132,7
	18	42	39,8	-94,2	-6705,8	-246,5	-7,8	-16,1	-137,9
	25	42	23,2	-59,9	-4346,2	-246,5	-7,8	-16,0	-138,5
	32	42	14,9	-48,5	-3075,2	-217,6	-6,2	-10,0	-135,1
	42	42	8,9	-44,6	-2058,6	-198,6	-6,0	-7,2	-127,2
2, 4	9	42	106,1	-77,2	-289,9	-168,3	-6,7	-3,9	-143,2
	12	42	72,3	-74,3	-209,3	-163,7	-5,7	-3,3	-135,3
	18	42	39,8	-68,2	-127,9	-155,4	-4,6	-3,5	-118,8
	25	42	23,2	-61,9	-83,4	-145,9	-3,9	-3,7	-100,3
	32	42	14,9	-56,1	-59,5	-136,3	-3,4	-3,6	-98,7
	42	42	8,9	-49,0	-40,4	-123,4	-2,8	-3,1	-93,7
3	9	42	106,1	-25,0	-361,5	-105,6	-2,0	-21,7	-130,1
	12	42	72,3	-23,4	-299,5	-99,7	-2,0	-19,1	-122,9
	18	42	39,8	-20,8	-216,6	-89,8	-1,9	-15,5	-110,1
	25	42	23,2	-18,3	-171,5	-80,4	-1,9	-12,6	-96,5
	32	42	14,9	-16,4	-144,6	-72,7	-1,8	-10,3	-84,5
	42	42	8,9	-14,3	-113,0	-63,9	-1,6	-8,0	-75,1

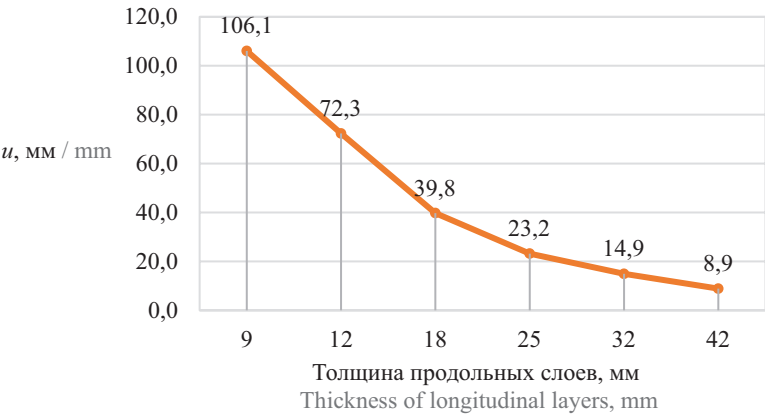


Рис. 3. Зависимость прогиба от толщины продольных слоев

Fig. 3. Dependence of deflection on thickness of longitudinal layers

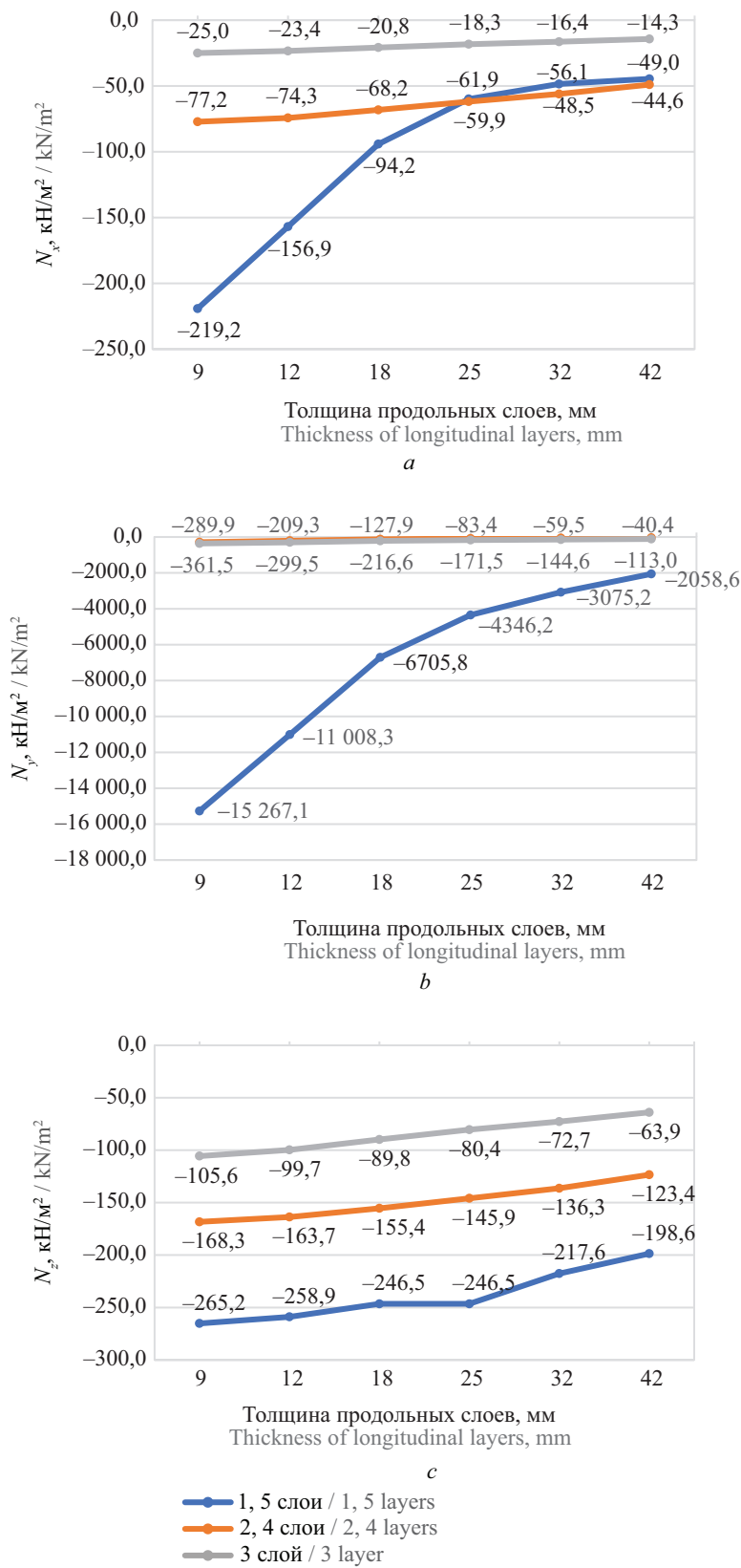


Рис. 4. Зависимость нормальных напряжений N_x , N_y , N_z от толщины продольных слоев
Fig. 4. Dependence of normal stresses N_x , N_y , N_z on thickness of longitudinal layers

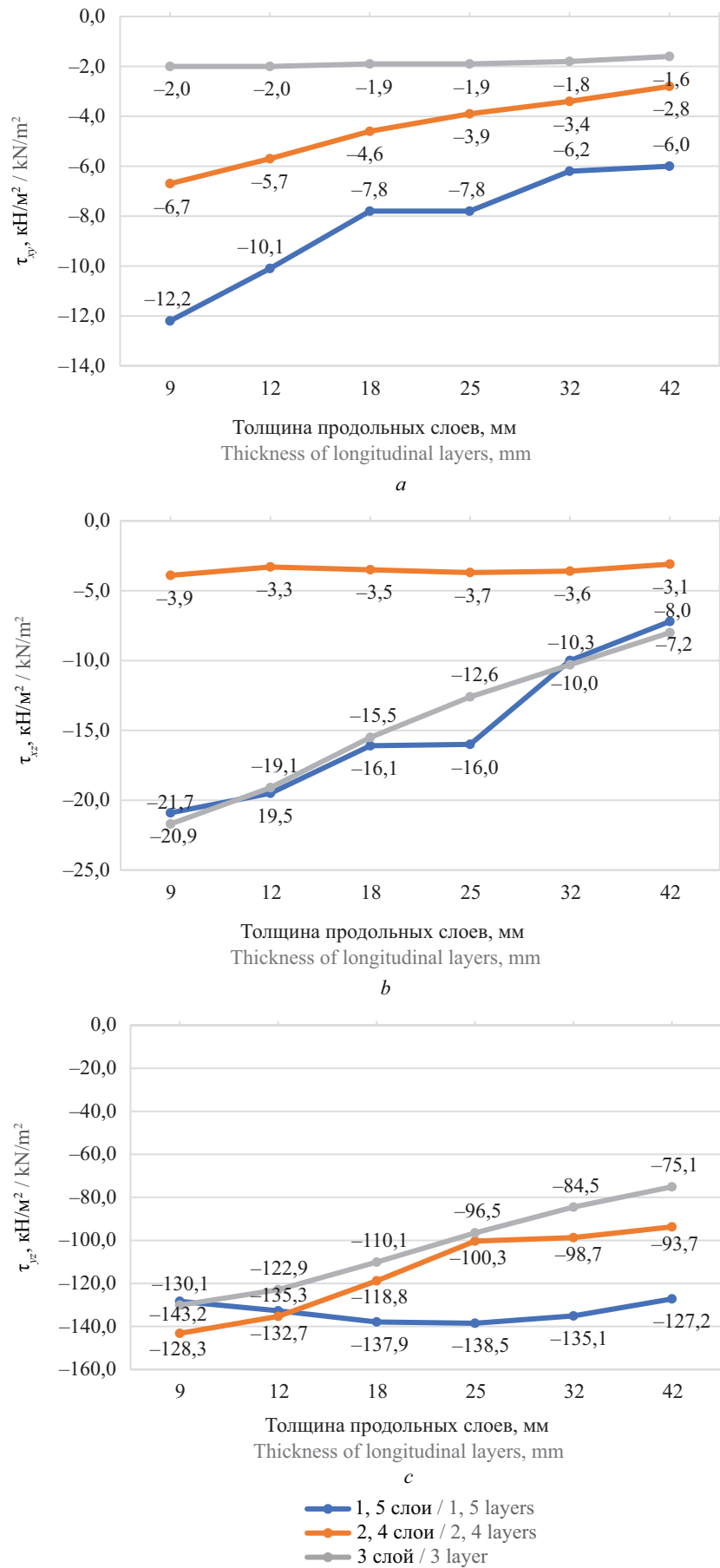


Рис. 5. Зависимость касательных напряжений τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} от толщины продольных слоев

Fig. 5. Dependence of tangential stresses τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} on thickness of longitudinal layers

Табл. 4. Пятислойная панель с продольным расположением досок в наружных слоях с варьируемой толщиной поперечных слоев

Table 4. A five-layer CLT-panel with longitudinal arrangement of boards in outer layers with varying thickness of transverse layers

Номер слоев Number layers	Толщина продольных слоев, мм Thickness of longitudinal layers, mm	Толщина поперечных слоев, мм Thickness of transverse layers, mm	u , мм mm	N_x , кН/м ² kN/m ²	N_y , кН/м ² kN/m ²	N_z , кН/м ² kN/m ²	τ_{xy} , кН/м ² kN/m ²	τ_{xz} , кН/м ² kN/m ²	τ_{yz} , кН/м ² kN/m ²
1, 5	42	9	22,9	-45,4	-3245,3	-208,0	-13,9	-8,2	-145,9
	42	12	20,6	-45,1	-3089,0	-205,5	-11,6	-8,4	-142,3
	42	18	16,9	-44,7	-2814,4	-202,4	-8,6	-8,5	-137,2
	42	25	13,7	-44,5	-2546,2	-200,4	-7,2	-8,1	-133,0
	42	32	11,3	-44,5	-2321,7	-199,3	-6,6	-7,7	-130,0
	42	42	8,9	-44,6	-2058,6	-198,6	-6,0	-7,2	-127,2
2, 4	42	9	22,9	-246,4	-61,6	-155,3	-7,6	-6,5	-135,6
	42	12	20,6	-199,0	-59,2	-150,5	-6,5	-5,1	-130,0
	42	18	16,9	-137,9	-54,6	-143,2	-4,9	-3,4	-120,1
	42	25	13,7	-96,3	-49,7	-136,6	-3,9	-3,2	-110,7
	42	32	11,3	-71,0	-45,4	-130,8	-3,3	-3,3	-102,8
	42	42	8,9	-49,0	-40,4	-123,4	-2,8	-3,1	-93,7
3	42	9	22,9	-18,0	-125,7	-89,2	-2,5	-15,2	-123,8
	42	12	20,6	-17,7	-123,8	-85,7	-2,3	-15,3	-116,1
	42	18	16,9	-17,1	-121,1	-79,8	-2,1	-14,1	-103,2
	42	25	13,7	-16,2	-118,6	-74,2	-1,9	-12,1	-91,2
	42	32	11,3	-15,4	-116,4	-69,5	-1,8	-10,2	-83,7
	42	42	8,9	-14,3	-113,0	-63,9	-1,6	-8,0	-75,1

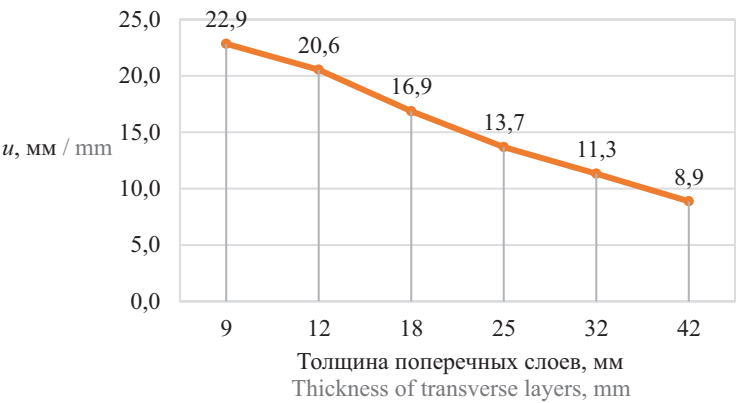


Рис. 6. Зависимость прогиба от толщины поперечных слоев

Fig. 6. Dependence of deflection on thickness of transverse layers

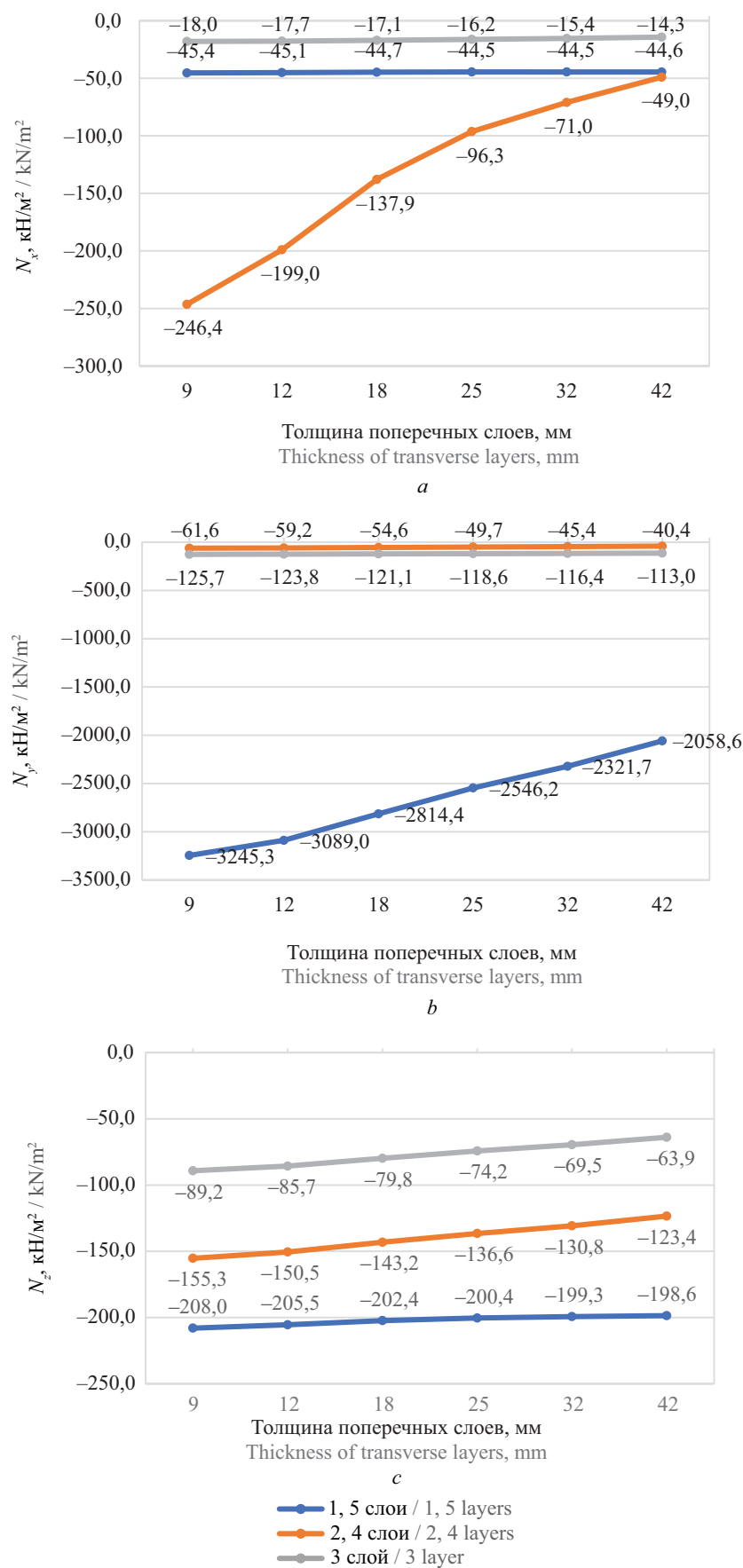


Рис. 7. Зависимость нормальных напряжений N_x , N_y , N_z от толщины поперечных слоев

Fig. 7. Dependence of normal stresses N_x , N_y , N_z on thickness of transverse layers

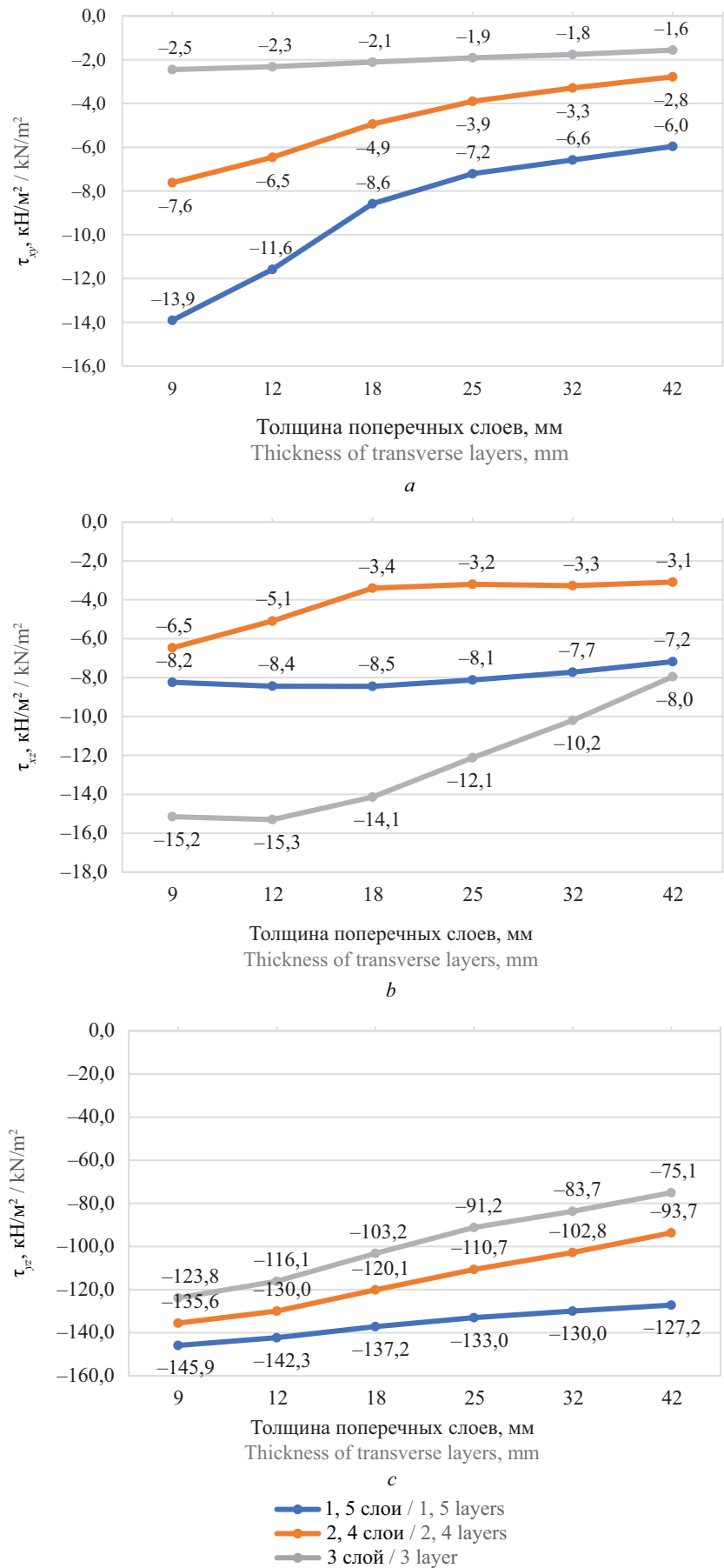


Рис. 8. Зависимость касательных напряжений τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} от толщины поперечных слоев

Fig. 8. Dependence of tangential stresses τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} on thickness of transverse layers

- по построенным графикам видно, что изменение толщины продольных и поперечных слоев оказывает существенное влияние на нормальные напряжения N_x в слоях 1, 5 и 2, 4 соответственно;
- при изменении толщины продольных и поперечных слоев нормальные напряжения N_z изменяются по одной закономерности и наибольшие значения возникают в слоях 1, 5, однако влияние

толщины продольных слоев на изменение этой величины сильнее, чем поперечных;

- изменение толщины продольного слоя досок оказывает существенное влияние на нормальные напряжения N_y в слоях 1, 5. При этом максимальное значение больше минимального более чем в 17 раз и возрастает с большой скоростью;
- в целом значения напряжений возрастают равномерно при уменьшении толщины досок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Трошин М.Ю., Турков А.В. Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах древесины перекрестно-клееной // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 3. С. 391–400. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.391-400
2. Shen Y., Schneider J., Stierner S.F., Ren X. Failure Modes and Mechanical Properties of Bracket Anchor Connections for Cross-Laminated-Timber // MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 275. P. 01011. DOI: 10.1051/mateconf/201927501011
3. Sebera V., Muszyński L., Tippner J., Noyel M., Pisaneschi T., Sundberg B. FE analysis of CLT panel subjected to torsion and verified by DIC // Materials and Structures. 2013. Vol. 48. Pp. 451–459. DOI: 10.1617/s11527-013-0195-1
4. Huang Z., Huang D., Chui Y.-H., Shen Y., Daneshvar H., Sheng B. et al. Modeling of Cross-Laminated Timber (CLT) panels loaded with combined out-of-plane bending and compression // Engineering Structures. 2022. Vol. 250. P. 113335. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113335
5. Christovasilis I.P., Brunetti M., Follesa M., Nocetti M., Vassallo D. Evaluation of the Mechanical Properties of Cross Laminated Timber with Elementary Beam Theories // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 122. Pp. 202–213. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.082
6. Lu W., Gu J., Wang B. Study on Flexural Behavior of Cross-Laminated Timber Based on Different Tree Species // Advances in Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–8. DOI: 10.1155/2019/1728258
7. Opazo-Vega A., Benedetti F., Nuñez-Decap M., Maureira-Carsalade N., Oyarzo-Vera C. Non-Destructive Assessment of the Elastic Properties of Low-Grade CLT Panels // Forests. 2021. Vol. 12. P. 1734. DOI: 10.3390/f12121734
8. Gagnon S., Popovski M. Structural Design of Cross-Laminated Timber Elements. Chapter 3, CLT Handbook. FPIInnovations. Québec, Canada, 2011.
9. Abejón R., Moya L. Cross-laminated timber: Perspectives from a bibliometric analysis (2006–2018) // Wood Material Science & Engin-

ering. 2021. Vol. 17. Issue 6. Pp. 429–450. DOI: 10.1080/17480272.2021.1955295

10. Юминова М.О., Крестьянникова А.Ю. Материалы и конструкции для строительства деревянных домов // Наука через призму времени. 2017. № 9. С. 42–51.

11. Смирнов П.Н., Филимонов М.А., Погорельцев А.А. Определение прочностных и упругих характеристик древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) и классификация по классам прочности. М. : Научно-исследовательский центр «Строительство», 2020. 175 с. EDN NRPYJP.

12. Филимонов М.А., Смирнов П.Н., Погорельцев А.А. Проведение исследований по определению несущей способности стеновых панелей и плит перекрытия из древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) и разработка методики расчета. М. : Научно-исследовательский центр «Строительство», 2020. 268 с. EDN NVQDYW.

13. Рогожина А.В. Расчет деформативности CLT-панели перекрытия // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_89__5_Rogozhina.pdf_10c4252bae.pdf

14. Филимонов М. А., Смирнов П.Н. Исследования прочностных и упругих характеристик плит из древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) российского производства // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 2. С. 81–97. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-81-97. EDN JEVVCF.

15. Мамедов Ш.М., Шабикова Е.Г., Нижегородцев Д.В., Казакевич Т.Н. Методика расчета панелей из перекрестно-клееной древесины // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5 (82). С. 66–71. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-66-71. EDN BNFNZY.

16. Бубис А.А., Гизятуллин И.Р., Хворова А.Н., Петров И.Ю. Особенности поведения древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) при статических и динамических нагрузках, моделирующих сейсмические воздействия // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 2. С. 62–80. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-62-80. EDN QYZGKG.

17. Чебыкин А.А., Фрицлер Ю.А., Кудрявцев С.В. Определение расчетных характеристик сечений дре-

весных клееных плит из перекрестных досок // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2017. № 2. С. 83–85.

18. Змеев М.В. Определение толщины перекрытия из перекрестно-клееных досок на примере CLT-плит Binderholz (Austria) из условия жесткости // Инженерный вестник Дона. 2020. № 11. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_35__10_Zmeev.pdf_91b8606af3.pdf

19. Щелокова Т.Н. Современные тенденции улучшения свойств древесины и деревянных строительных конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 6. С. 39–45. DOI: 10.12737/article_5b115a65781d87.13857188. EDN XTRGIP.

20. Мавлюбердинов А.Р., Хоцанян Д.Н. Технологические особенности возведения многоэтажных жилых зданий из CLT-панелей // Известия КГАСУ. 2018. № 1 (43) С. 219–225. EDN UOVVCG.

Поступила в редакцию 23 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 26 июня 2023 г.

Одобрена для публикации 29 июля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Михаил Юрьевич Трошин — аспирант; Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева (ОГУ им. И.С. Тургенева); 302030, Орловская область, г. Орел, Комсомольская ул., д. 95; mtr997@mail.ru;

Андрей Викторович Турков — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций и материалов; Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева (ОГУ им. И.С. Тургенева); 302030, Орловская область, г. Орел, Комсомольская ул., д. 95; РИНЦ ID: 543490, Scopus: 57193456012, ORCID: 0000-0003-1944-8529; aturkov@bk.ru.

Вклад авторов:

Трошин М.Ю. — сбор, анализ и обработка материала, написание статьи и оформление текста.

Турков А.В. — концепция, научное руководство.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Troshin M.Yu., Turkov A.V. The effect of thickness of transverse and longitudinal layers on deformability and stress distribution in three-layer panels made of cross-laminated timber. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(3):391-400. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.391-400 (rus.).

2. Shen Y., Schneider J., Stierner S.F., Ren X. Failure Modes and Mechanical Properties of Bracket Anchor Connections for Cross-Laminated-Timber. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 275:01011. DOI: 10.1051/mateconf/201927501011

3. Sebera V., Muszyński L., Tippner J., Noyel M., Pisaneschi T., Sundberg B. FE analysis of CLT panel subjected to torsion and verified by DIC. *Materials and Structures*. 2013; 48:451-459. DOI: 10.1617/s11527-013-0195-1

4. Huang Z., Huang D., Chui Y.-H., Shen Y., Daneshvar H., Sheng B. et al. Modeling of Cross-Laminated Timber (CLT) panels loaded with combined out-of-plane bending and compression. *Engineering Structures*. 2022; 250:113335. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113335

5. Christovasilis I.P., Brunetti M., Follesa M., Nocetti M., Vassallo D. Evaluation of the Mechanical Properties of Cross Laminated Timber with Elementary Beam Theories. *Construction and Building Materials*. 2016; 122:202-213. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.082

6. Lu W., Gu J., Wang B. Study on Flexural Behavior of Cross-Laminated Timber Based on Different Tree Species. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019; 2019:1-8. DOI: 10.1155/2019/1728258

7. Opazo-Vega A., Benedetti F., Nuñez-Decap M., Maureira-Carsalade N., Oyarzo-Vera C. Non-Destructive Assessment of the Elastic Properties of Low-Grade CLT Panels. *Forests*. 2021; 12:1734. DOI: 10.3390/f12121734

8. Gagnon S., Popovski M. *Structural Design of Cross-Laminated Timber Elements. Chapter 3, CLT Handbook. FPIInnovations*. Québec, Canada, 2011.

9. Abejón R., Moya L. Cross-laminated timber: Perspectives from a bibliometric analysis (2006–2018). *Wood Material Science & Engineering*. 2021; 17(6):429-450. DOI: 10.1080/17480272.2021.1955295

10. Kreстьяnikova A.Yu., Yuminova M.O. Materials and structures for the construction of wooden houses. *Science through the prism of time*. 2017; 9:42-51. (rus.).

11. Smirnov P.N., Filimonov M.A., Pogoreltsev A.A. *Determination of the strength and elastic characteristics of cross-laminated wood (WPC/CLT) and classification by strength classes*. Moscow, Scientific Research Center “Construction”, 2020; 175. EDN NRPYJP. (rus.).

12. Filimonov M.A., Smirnov P.N., Pogoreltsev A.A. *Conducting research to determine the load-bearing capacity of wall panels and floor slabs made of cross-laminated wood (WPC/CLT) and developing a calculation meth-*

odology. Moscow, Scientific Research Center “Construction”, 2020; 268. EDN NVQDYW. (rus.).

13. Rogozhina A.V. Calculation of the deformability of the CLT overlap panel. *Engineering Journal of Don*. 2022; 6. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_89_5_Rogozhina.pdf_10c4252bae.pdf (rus.).

14. Filimonov M.A., Smirnov P.N. Research of strength and elastic characteristics of Russian-made cross laminated timber slabs. *Earthquake engineering. Construction safety*. 2022; 2:81-97. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-81-97. EDN JEVVCF. (rus.).

15. Mamedov Sh.M., Shabikova E.G., Nizhegorodtsev D.V., Kazakevich T.N. Method for calculating cross laminated timber panels. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 5(82):66-71. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-66-71. EDN BNFNZY. (rus.).

16. Bubis A.A., Giziatullin I.R., Petrov I.Yu., Khvorova A.N. Peculiarities of behavior of cross-laminated timber (CLT) under static and dynamic loads simulating seismic impacts. *Earthquake engineering. Construction*

safety. 2022; 2:62-80 DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-62-80. EDN QYZGKG. (rus.).

17. Chebykin A.A., Fricler Yu.A., Kudryavcev S.V. Evaluation of cross section design properties for plates from cross laminated timber. *Academic Bulletin of Ural-NIiproekt RAASN*. 2017; 2:83-85. (rus.).

18. Zmeev M.V. Determination of the floor thickness of cross-glued boards on example of CLT-plates Binderholz (Austria). *Engineering Journal of Don*. 2020; 11. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_35_10_Zmeev.pdf_91b8606af3.pdf (rus.).

19. Shchelokova T.N. Modern trends of improvement of wood properties and wood constructions. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018; 6:39-45. DOI: 10.12737/article_5b115a65781d87.13857188. EDN XTRGIP. (rus.).

20. Mavlyuberdinov A.R., Khotsanian D.N. Technological features of erecting multi-storey residential buildings from CLT-panels. *News of the KSUAE*. 2018; 1(43):219-225. EDN UOVVCG. (rus.).

Received June 23, 2023.

Adopted in revised form on June 26, 2023.

Approved for publication on July 29, 2023.

BIONOTES: **Mikhail Yu. Troshin** — postgraduate student; **Orel State University named after I.S. Turgenev (Orel State University)**; 95 Komsomolskaya st., Orel, 302030, Russian Federation; mtr997@mail.ru;

Andrej V. Turkov — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Building Structures and Materials; **Orel State University named after I.S. Turgenev (Orel State University)**; 95 Komsomolskaya st., Orel, 302030, Russian Federation; ID RSCI: 543490, Scopus: 57193456012, ORCID: 0000-0003-1944-8529; aturkov@bk.ru.

Contribution of the authors:

Mikhail Yu. Troshin — collection, analysis and processing of material, writing an article and text design.

Andrej V. Turkov — concept, scientific guidance.

The authors declare that there is no conflict of interest.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 504.05:553

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1599-1607

Опасные геологические процессы на участках объектов незавершенного строительства

Антонина Львовна Суздалева¹, Михаил Юрьевич Слесарев²,
Ирина Юрьевна Яковлева²

¹ *Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ МЭИ);
г. Москва, Россия;*

² *Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель исследования — изучение закономерностей развития опасных геологических процессов, обусловленных прекращением строительства зданий на длительный период. Эти процессы включают любые изменения земной коры, способные оказать негативное влияние на условия жизни населения и нанести экономический ущерб.

Материалы и методы. Исследования осуществлялись на территории Москвы, а также Московской и Калужской областей. Предмет изучения — природно-техническая система (ПТС), формирующаяся в процессе разрушения объекта незавершенного строительства (ОНС). Особое внимание уделялось территориям, окружающим долгострои, работы на которых не проводились в течение многих лет.

Результаты. На территориях, окружающих заброшенные недостроенные объекты, наибольшую опасность представляют: суффозия; карст; эрозия; оползни; разжижение грунтов и горных пород, вызывающее снижение их прочности. На основе обобщающего анализа полученных данных создана классификация ОНС. В ней одновременно учитываются состояние строительных конструкций и опасные изменения на окружающей территории. Практическое использование классификации позволит придать деятельности по решению проблемы заброшенных зданий системный характер. Присвоение ОНС определенного статуса может служить обоснованием для его восстановления или ликвидации. Разработана программа расконсервации незавершенных объектов.

Выводы. Адекватное представление о влиянии ОНС на условия жизни в городе может дать только изучение природно-технической системы, сформировавшейся в период остановки работ. Ее основными элементами являются: недостроенное здание и участок, на котором наблюдается развитие опасных процессов, вызванных разрушением. Необходимо создание информационного массива по ОНС, включающего не подлежащие восстановлению долгострои. Расконсервация недостроенных зданий для возобновления их строительства должна осуществляться после обязательного исследования тенденций развития опасных геологических процессов, возникших в период остановки строительства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: долгострои, заброшенные здания, расконсервация зданий, эрозия, суффозия, техногенные скопления вод

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Суздалева А.Л., Слесарев М.Ю., Яковлева И.Ю. Опасные геологические процессы на участках объектов незавершенного строительства // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 10. С. 1599–1607. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1599-1607

Автор, ответственный за переписку: Антонина Львовна Суздалева, SuzdalevaAL@yandex.ru.

Hazardous geological processes at incomplete construction sites

Antonina L. Suzdaleva¹, Mikhail Yu. Slesarev², Irina Yu. Yakovleva²

¹ *National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI); Moscow, Russian Federation;*

² *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the research is to study the regularities of development of hazardous geological processes caused by the termination of construction of buildings for a long time. These processes include any changes in the Earth's crust that can have a negative impact on the living conditions of the population and cause economic damage.

Materials and methods. The research was carried out on the territory of Moscow, as well as Moscow and Kaluga regions. The subject of the study was the natural and technical system formed in the process of destruction of incomplete construction objects. Special attention was paid to the territories surrounding the long-term abandoned buildings, where no work had been carried out for many years.

Results. On the territories surrounding the abandoned incomplete objects, the greatest danger are: suffosion, karst, erosion, landslides, liquefaction of soils and rocks, causing a decrease in their strength. The generalized analysis of the obtained data made it possible to create a classification of incomplete construction objects. It simultaneously takes into account the condition of building structures and hazardous changes in the surrounding area. The practical application of the classification will provide a systemic character of activities aimed at solving the problem of abandoned buildings. Assigning a certain status to an unfinished construction object can serve as a justification for its restoration or liquidation. A programme for depreservation of incomplete objects was developed.

Conclusions. An adequate idea of the impact of an unfinished construction project on living conditions in the city can only be given by studying the natural and technical system that formed during the period of stoppage of work. Its main elements are: an incomplete building and a site where the development of hazardous processes caused by destruction is observed. It is necessary to create an information array on incomplete construction objects, which would include long-term abandoned buildings that are not subject to restoration. The depreservation of incomplete buildings for their further construction should be carried out after a mandatory study of tendencies in the development of dangerous geological processes that occurred during the period of construction stoppage.

KEYWORDS: long-term abandoned buildings, abandoned buildings, depreservation of buildings, erosion, suffosion, technogenic water accumulations

FOR CITATION: Suzdaleva A.L., Slesarev M.Yu., Yakovleva I.Yu. Hazardous geological processes at incomplete construction sites. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(10):1599-1607. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1599-1607 (rus.).

Corresponding author: Antonina L. Suzdaleva, SuzdalevaAL@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно положениям Градостроительного кодекса РФ (ст. 1, п. 10), объектом незавершенного строительства (ОНС) является любое капитальное здание, строение, сооружение, работы по возведению которых еще не окончены. Подобная трактовка понятия порождает неопределенность в данном вопросе. С одной стороны, это строящиеся объекты, а с другой — объекты, работы на которых не осуществляются в течение длительного периода. Для их обозначения часто используется термин «долгострой» [1–3]. Основной причиной их возникновения является высокая нестабильность экономической ситуации. Прекращение строительства из-за финансовой нецелесообразности в большинстве случаев находит отражение в нежелании выделять достаточные средства на консервацию незавершенных объектов, поэтому состояние долгостроев, как и участков, отведенных под их строительство, практически не контролируется. Со временем происходит не только постепенное разрушение их конструкций, практически неконтролируемые долгострои становятся фактором ухудшения условий жизни населения в окружающей городской застройке [4–9]. Зброшеннe здания, окруженные заросшими участками, привлекают в район маргинальные группы социума [10–12]. На этих территориях образуются несанкционированные свалки бытовых отходов, в массовом количестве развиваются нежелательные организмы (мухи, комары, крысы и др.), способные служить переносчиками инфекционных заболеваний [13]. Результатом становится снижение имиджа района размещения долгостроев. В некоторых случаях он превращается в депрессивное пространство, лишенное социальной и инвестиционной привлекательности [14]. Особую опасность для городского населения представляют процессы, вызывающие разрушение и трансформацию геологической среды. Подобные опасные геологические

процессы, источник которых — долгострой, могут распространяться далеко за пределы территории, ранее отведенной под их строительство.

Необходима разработка эффективных методов управления градостроительной деятельностью, способных минимизировать возникающие риски. В статье изложены результаты исследований, проведенных авторами с целью создания научной базы для решения данной задачи.

Опасные геологические процессы включают любые изменения земной коры, которые способны оказать негативное воздействие на жизнедеятельность людей и привести к разрушению созданных ими объектов. По своему характеру и динамике развития эти процессы весьма разнообразны. На урбанизированных территориях наибольшую значимость в настоящее время приобрели: подтопление, суффозия, карст, эрозия, оползнеобразование, а также разжижение грунтов и горных пород, вызывающие снижение их прочностных свойств. Опасность этих процессов возрастает при увеличении масштабов градостроительной деятельности [15–17]. Данная тенденция обусловлена несколькими факторами.

1. Возведение большинства объектов капитального строительства (ОКС) на городской территории, включая ее периферию, осуществляется на участках земной коры, структура и свойства которых в предшествующий период уже изменились под воздействием различных видов человеческой деятельности. Основоположник инженерной геологии академик Е.М. Сергеев предложил для обозначения подобных участков литосферы термин «геологическая среда» [18]. Слагающие ее техногенные геологические тела, несмотря на большее разнообразие, обладают общей чертой, которая заключается в их меньшей устойчивости по отношению к природным и техногенным воздействиям по сравнению с естественными массивами горных пород [19].

2. Техногенное воздействие на литосферу в ходе градостроительной деятельности постоянно возрас-

тает, что также повышает риск развития опасных геологических процессов. Например, возведение высотных зданий приводит к увеличению статической нагрузки. Заложение фундаментов нередко сопровождается барражными эффектами, последствием которых могут стать подтопление больших участков окружающей территории, разжижение грунтов и образование подземных промоин.

3. Геологическая среда современных городов насыщена подземными коммуникациями, что также в целом снижает ее устойчивость. Например, над линиями метрополитена нередко возникают проседания земной поверхности, создающие угрозу разрушения зданий. Большую опасность представляет обводнение подземных грунтов в результате многочисленных протечек водопроводных и канализационных подземных трасс.

При возведении ОКС предпринимаются специальные меры по предупреждению описанных выше явлений или минимизации риска их развития. Но при остановке работ на длительный срок ситуация принципиально меняется. На участках долгостроев возникают условия, значительно более благоприятные для развития опасных геологических процессов, чем в период, предшествовавший началу строительства. Основными причинами этого являются:

- отсутствие функционирующей системы водоотведения поверхностного стока;
- неконтролируемое развитие барражных явлений у фундаментов и подземных сооружений незавершенных объектов;
- образование техногенных скоплений вод в искусственно созданных углублениях рельефа (например, котлованах) и у барьеров на пути перемещения поверхностного стока (например, насыпях), а также подземных помещениях [20];
- остающиеся после прекращения работ участки поврежденного или скальпированного почвенно-грунтового покрова;
- разрушение конструкций ОНС, провоцирующее деформацию земной поверхности.

Последствия этих воздействий нередко носят взаимообусловленный и многоплановый характер. Поэтому провести четкую границу между причинами отдельных негативных явлений в ряде случаев затруднительно. Так, усиление карстово-суффозионных процессов одновременно может быть связано с барражем и образованием техногенных скоплений вод. Эрозионные явления значительно интенсифицируются, когда сток дождевых и талых вод с территории незавершенного объекта проходит через участки нарушенного в ходе строительных работ почвенно-грунтового покрова. Обводнение толщи грунтов, сопутствующее данным явлениям, одновременно может вызвать и активизацию склоновых процессов.

Следует также отметить, что в некоторых климатических зонах значимость могут приобретать и иные факторы. Например, в аридных условиях на участках

незавершенного строительства может наблюдаться интенсивная дефляция. В Арктике при остановке работ по возведению зданий опасность могут представлять неконтролируемые термокарстовые процессы.

Но, несмотря на многообразие причин и последствий перечисленных явлений, практически во всех случаях проявляется одна общая тенденция — опасные геологические процессы на участках долгостроев протекают более интенсивно, чем в других частях городской территории. Это обуславливает необходимость их мониторинга, а также проведения специальных инженерно-геологических и инженерно-геодезических изысканий для оценки уровня развития данных процессов перед возобновлением работ (расконсервации ОНС).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование ОНС осуществлялось в 2016–2022 гг. на территории Москвы, а также в Московской и Калужской областях. При их проведении применялся принцип системной территориальности [21], в соответствии с которым предметом изучения служил не абстрагированный от окружающей среды объект незавершенного строительства, а формирующаяся на его основе природно-техническая система. В исследуемую природно-техническую систему (ПТС) включались все участки, на которых отмечалось влияние незавершенного объекта, т.е. произошедшие полностью или частично изменения условий окружающей среды, обусловленные его существованием (консервацией, разрушением конструкций, деградацией строительной площадки и др.). В ряде случаев границы ПТС совпадали с границами территории, отведенной под застройку. В других случаях образовавшаяся ПТС выходила за ее пределы. Это проявлялось в развитии на границах с ней участках таких явлений, как овражная эрозия, деформация склонов, подтопление и образование техногенных скоплений вод. Таким образом, проводившиеся обследования незавершенных объектов одновременно включали два направления:

- исследование состояния конструкций здания или сооружения;
- оценку характера деградации окружающей его территории в границах сформировавшейся на данный момент времени ПТС.

Определение характера и степени повреждения конструкций незавершенных объектов проводилось с учетом требований нормативных документов, содержащих правила оценки технического состояния ОКС и их мониторинга: ГОСТ 31937–2011; СП 13-102–2003; СТО НОСТРОЙ 2.33.79–2012; Методические рекомендации по заполнению формы сведений о незавершенных объектах капитального строительства, строительство, реконструкция которых

осуществлялись полностью или частично за счет средств федерального бюджета, 2022¹.

Оценка уровня развития опасных геологических процессов осуществлялась на основании положений СП 11-105-97 Часть II; СП 425.1325800.2018; СП 499.1325800.2021².

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обобщенный анализ полученных материалов позволяет сделать заключение о сопряженности во времени процессов разрушения строительных конструкций незавершенных объектов и уровня деградации окружающей территории, т.е. сформировавшейся на их основе ПТС. Для конкретного срока, прошедшего с момента остановки строительства, характерны как определенный уровень физического износа постройки, так и степень развития негативных явлений, в том числе опасных геологических процессов. Подобная сопряженность развития этих разнородных явлений обусловлена двумя основными причинами:

1. Характерные этапы процессов разрушения различных незавершенных объектов и деградации окружающей их среды в большинстве случаев происходят по прошествии определенного времени. Это совпадение относительно и скорее носит характер общей тенденции, а не четко выраженной закономерности. Ее существование обусловлено тем, что скорость обоих процессов во многом устанавливается одними и теми же внешними факторами, главным образом гидрометеорологическими.

2. Эти процессы часто испытывают взаимное влияние. Так, нарушение гидроизоляции помещений, сопровождающееся образованием в них тех-

ногенных скоплений вод, может стать причиной интенсивных карстово-суффозионных процессов, приводящих к деформации ОНС.

Сопряженность процессов разрушения строительных конструкций и развитие на окружающей территории опасных геологических процессов позволяет выделить *несколько характерных этапов деградации незавершенных объектов* и их классифицировать:

1. *Нулевая степень деградации*, свойственная зданиям и сооружениям, срок остановки работ на которых не превышает 6 месяцев. Заметных признаков нарушения целостности конструкций и негативных изменений на территории застройки не наблюдается.

2. *Слабая степень деградации*, характерная для объектов, работы на которых остановлены на срок более полугода, но не превышающий 3 года. В течение этого периода обычно появляются первые признаки разрушения целостности конструкции в виде небольших деформаций, не требующих проведения капитального ремонта. Нередко на открытых участках территории застройки формируются техногенные скопления вод, которые могут интенсифицировать карстово-суффозионные процессы, внешние проявления которых на данном этапе не наблюдаются. Водная эрозия носит в основном плоскостной характер, но на отдельных участках могут отмечаться начальные проявления линейной водной эрозии — так называемые мелкие промоины, глубиной менее 0,7 м.

3. *Средняя степень деградации* обычно наблюдается на территории, окружающей здания и сооружения, работы на которых не осуществляются в течение 3–5 лет. Как правило, они имеют разрушения целостности конструкций, для восстановления которых необходимо проведение капитального ремонта. В большинстве случаев отмечается образование техногенных скоплений вод в подземных помещениях. Появляются внешние признаки разрушительных карстово-суффозионных процессов, например проседания грунта по периметру фундамента (рис. 1).

4. *Сильная степень деградации* характерна для зданий и сооружений, заброшенных в течение 5–25 лет. На таких объектах обычно наблюдается сильное разрушение отдельных частей строительных конструкций, восстановление которых невозможно. Значительная часть подземных помещений обычно постоянно затоплена (рис. 2). Разрушительные геодинамические процессы (эрозия, суффозия и др.) на территории застройки могут создавать угрозу для людей (образование подземных пустот, провалов, глубоких промоин).

5. *Весьма сильная степень деградации*. Такого состояния недостроенные здания и сооружения, как правило, достигают после прекращения работ на срок более 25 лет. За это время происходит их полное или частичное руинирование, заключающееся в обрушении конструкций и их фрагментации. Характерной чертой является заболачивание территорий, занятых техногенными скоплениями

¹ ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния; СП 13-102–2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений; СТО НОСТРОЙ 2.33.79–2012. Обследование ограждающих конструкций зданий и сооружений в натурных условиях и оценка их технического состояния. Правила, контроль выполнения и требования к результатам работ; Методические рекомендации по заполнению формы сведений о незавершенных объектах капитального строительства, строительство, реконструкция которых осуществлялись полностью или частично за счет средств федерального бюджета : утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 26.07.2022 № 607/пр.

² СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов; СП 425.1325800.2018. Инженерная защита территорий от эрозионных процессов. Правила проектирования; СП 499.1325800.2021. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от карстово-суффозионных процессов. Правила проектирования.



Рис. 1. Суффозия. Объект — жилой дом (г. Москва, ул. Малыгина, д. 12). Въезд на парковку

Fig. 1. Suffosion. Object — residential building (12 Malygina st., Moscow). Entrance to parking

вод, в результате накопления в них биогенных отложений и аккумуляции мусора. Развитие опасных геологических процессов (овражной эрозии, оползнеобразования и др.) распространяется и на прилегающие участки территории.

На практике отнесение незавершенного объекта к одной из описанных категорий иногда вызывает определенные затруднения. Так, далеко не всегда значительному разрушению строительных конструкций сопутствует высокий уровень

развития опасных геологических процессов. Кроме того, на некоторых незавершенных объектах было несколько периодов прекращения работ или осуществлялась достройка только их отдельных частей.

Основные результаты проведенных исследований можно кратко резюмировать следующим образом.

1. В качестве ОНС необходимо рассматривать не только здание или сооружение, но и участок, в границах которого в период остановки работ сформировалась ПТС.

2. Правила составления Единого реестра проблемных объектов (ЕРПО) следует пересмотреть, включив в него все категории ОНС, в том числе долгострой.

3. Принятие решений по расконсервации незавершенных объектов должно осуществляться с учетом результатов дополнительных инженерных изысканий, проводимых с целью определения степени развития опасных геологических процессов и разработки мер по предотвращению их негативных последствий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

С целью выработки системного решения по ОНС в Российской Федерации создан ЕРПО. Однако содержащиеся в нем сведения касаются главным образом недостроенных жилых домов, работы на которых остановлены относительно недавно. Степень деградации этих объектов не оценивается, как и характер действий, необходимых для их расконсервации. Подобное положение объясняется тем, что данный реестр предназначен для помощи в восстановлении прав пострадавших участников долевого жилищного строительства. Он формируется на базе Единой информационной системы жилищного строительства (ЕИСЖС), действующей с 1 января 2018 г. на основании Федерального зако-



Рис. 2. Объект — жилой дом (г. Белоусово, Жуковский район Калужской области). Общий вид и техногенное скопление вод в подвальном помещении

Fig. 2. Object — residential building (Belousovo, Zhukovsky district, Kaluga region). General view and technogenic accumulation of water in the basement

на № 214-ФЗ³. В результате в реестр не включаются данные, характеризующие значительный сегмент незавершенных объектов, которые относятся к разряду долгостроев и оказывают значимое влияние на условия жизни в городах.

Актуализация ЕРПО на основе представленной в статье классификации дает возможность систематизировать материалы по всем незавершенным объектам и выработать общую стратегию решения данной проблемы. Так, отнесение недостроенного здания или сооружения к 4–5 степени деградации может служить основанием для сноса, поскольку их дальнейшее существование приведет к закономерному росту комплекса рисков на окружающей территории. Не менее важной с практической точки зрения задачей является обеспечение безопасности при расконсервации объектов, восстановление которых еще возможно. Это подразумевает гарантированное снижение до допустимого уровня рисков, возникающих как при возобновлении строительства данного объекта, так и по его завершению. Выполнение этой задачи, прежде всего, требует оценки характера и тенденций развития опасных геологических процессов, протекавших на территории застройки в период остановки работ. Их последствия, например просадочная деформация конструкций или возникновение провалов, могут проявиться уже после сдачи этих зданий в эксплуатацию. Вместе с тем действующая правовая база не требует решения данной проблемы, и при формальном подходе к продолжению строительства незавершенных объектов этот вопрос может игнорироваться. Существенное значение имеет также и то, что отсутствие четко сформулированных требований позволяет застройщику или заказчику строительства сэкономить средства, необходимые для проведения дополнительных инженерных изысканий. Положения Градостроительного кодекса РФ формулируют лишь общий подход к расконсервации незавершенных объектов, под которым подразумевается совокупность технических и организационных мер, осуществляемых с целью возобновления эксплуатации объекта. В Постановлении Правительства РФ от 30.09.2011 № 802⁴ уточняется, что возможность возобновления строительства объектов после длительного перерыва должна устанавливаться специализированными проектными и научно-исследовательскими организациями на основе освидетельствования конструкций, определения их фактической прочности и уровня коррозионного по-

ражения конструктивных элементов. В результате при расконсервации объекта обследованию подлежат только недостроенное здание [22]. Осуществление инженерно-геологических и инженерно-геодезических изысканий нормативно-правовой базой не предусмотрено. Проведенные исследования позволяют сделать заключение, что к разработке проектов по достройке незавершенных объектов необходим более широкий комплексный подход. С этой целью авторами разработана Программа расконсервации незавершенных объектов, предусматривающая выполнение следующих действий:

1. Проведения технического обследования недостроенного здания (согласно требованиям СП 13-102-2003).

2. Проведения инженерно-геологических изысканий с целью получения:

- данных об изменении состояния и свойств грунтов на участке строительства;
- сведений об изменениях характеристик гидрогеологических условий на участке строительства, в том числе положения уровня подземных вод, степени агрессивности их к бетону и к металлам;
- данных локального мониторинга изменения отдельных факторов инженерно-геологических условий на территории, окружающей незавершенный объект;
- общей оценки изменений инженерно-геологических условий в период простоя недостроенного здания, тенденции их дальнейших изменений с указанием причин и факторов, их обусловивших;
- рекомендаций (разработанных на основе изысканий) по повышению надежности и безопасности условий достройки и эксплуатации зданий и сооружений (усиление фундаментов, закрепление грунтов оснований, устранение дефектов планировки, совершенствование способов инженерной защиты и др.).

3. Проведения инженерно-геодезических изысканий с целью получения:

- актуализированного инженерно-топографического плана участка строительства;
- исполнительных схем несущих и ограждающих конструкций здания;
- зафиксированных изменений рельефа, произошедших в период остановки строительных работ на окружающей объект территории.

4. Определения границ ПТС, сформировавшейся на базе незавершенного объекта, т.е. зоны влияния процессов, обусловленных деградацией территории, отведенной под застройку, с целью разработки мер по минимизации рисков дальнейшего развития ранее наблюдавшихся опасных геологических процессов.

Использование данной программы даст возможность систематизировать деятельность по решению проблем долгостроев и снизить риск развития опасных геологических процессов на территории городской застройки.

³ Об участии в долевом строительстве многоквартирных домов и иных объектов недвижимости и о внесении изменений в некоторые законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон от 30.12.2004 № 214-ФЗ.

⁴ Об утверждении Правил проведения консервации объекта капитального строительства : Постановление Правительства РФ от 30.09.2011 № 802.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Орлова Л.Н. Некоторые аспекты обеспечения инсоляции застройки при решении проблемы долгостроев // Приволжский научный журнал. 2020. № 1 (53). С. 274–281. EDN MMRKY.
2. Панкратов О.Е., Панкратов Е.П. Проблемы незавершенного строительства и пути его сокращения // Экономика строительства. 2020. № 5 (65). С. 3–13. EDN BIVGHP.
3. Газимагомаева А.А. Инвестиции в недвижимость: проблемы «долгостроев» // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 86–4. С. 46–48. DOI: 10.18411/trnio-06-2022-148. EDN FLRWRX.
4. Spelman W. Abandoned Buildings: Magnets for Crime // Journal of Criminal Justice. 1993. Vol. 21. Issue 5. Pp. 481–495. DOI: 10.1016/0047-2352(93)90033-j
5. Accordino J., Johnson G. Addressing the Vacant and Abandoned Property Problem // Journal of Urban Affairs. 2000. Vol. 22. Issue 3. Pp. 301–315. DOI: 10.1111/0735-2166.00058
6. Branas C.C., Cheney R.A., MacDonald J.M., Tam V.W., Jackson T.D., Ten Have T.R. A Difference-in-Differences Analysis of Health, Safety, and Greening Vacant Urban Space // American Journal of Epidemiology. 2011. Vol. 174. Issue 11. Pp. 1296–1306. DOI: 10.1093/aje/kwr273
7. Shane J.M. Abandoned Buildings and Lots // Center for Problem-Oriented Policing. 2012. Issue 64. 80 p. URL: <https://popcenter.asu.edu/content/abandoned-buildings-and-lots-0>
8. Faur F., Apostu I.-M. The impact and the risk of abandoned buildings from Petroșani city on the urban environment // Studia Universitatis Babeș-Bolyai Ambientum. 2019. Vol. 64. Issue 2. Pp. 11–30. DOI: 10.24193/subbambientum.2019.2.02
9. Joo H., Lee S. Spatial Analysis of Abandoned Houses and Their Influencing Factors in South Korea // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Issue 18. P. 8576. DOI: 10.3390/app11188576
10. Cohen J. Abandoned Housing: Exploring Lessons from Baltimore // Housing Policy Debate. 2001. Vol. 12. Issue 3. Pp. 415–448. DOI: 10.1080/10511482.2001.9521413
11. Holcomb J. Abandoning Places // FBI Law Enforcement Bulletin. 2008. Vol. 77. Issue 10. Pp. 22–32. URL: <https://www.ojp.gov/ncjrs/virtual-library/abstracts/abandoning-places>
12. Han H.-S. The Impact of Abandoned Properties on Nearby Property Value // Housing Policy Debate. 2014. Vol. 24. Issue 2. Pp. 311–334. DOI: 10.1080/10511482.2013.832350
13. Суздалева А.Л. Биолого-социальные чрезвычайные ситуации // Естественные и технические науки. 2022. № 8 (171). С. 114–115. DOI: 10.25633/ETN.2022.08.08. EDN DCHKRL.
14. Суздалева А.Л. Депрессивные пространства: основные виды и механизмы образования // Естественные и технические науки. 2022. № 8 (171). С. 116–117. DOI: 10.25633/ETN.2022.08.09. EDN TOSECA.
15. Shikangalah R.N., Jeltsch F., Blaum N., Mueller E. A Review on Urban Soil Water Erosion // Journal for Studies in Humanities and Social Sciences. 2016. Vol. 5. Issue 1. URL: <http://hdl.handle.net/11070/1837>
16. Tang H., Shi P., Fu X. An Analysis of Soil Erosion on Construction Sites in Megacities Using Analytic Hierarchy Process // Sustainability. 2023. Vol. 15. Issue 2. P. 1325. DOI: 10.3390/su15021325
17. Isola F., Lai S., Leone F., Zoppi C. Land Take and Landslide Hazard: Spatial Assessment and Policy Implications from a Study Concerning Sardinia // Land. 2023. Vol. 12. Issue 2. P. 359. DOI: 10.3390/land12020359
18. Сергеев Е.М. Инженерная геология — наука о геологической среде // Инженерная геология. 1979. № 1. С. 1–9. URL: https://geoenv.ru/materials/sergeev_disk_2/22_%D0%B8%D0%B3-1979-1.pdf?ysclid=li64eomvda127305369
19. Суздалева А.Л. Вторая геология — наука о техногенных телах литосферы : монография. М. : РадиоСофт, 2022. 584 с. URL: <https://ntsyst.ru/pages/geologysecond2.html>
20. Суздалева А.Л., Горюнова С.В., Безносков В.Н. Техногенные скопления вод: экологические проблемы и пути их решения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: экология и безопасность жизнедеятельности. 2015. № 4. С. 107–113. EDN VBICOD.
21. Яковлева И.Ю., Суздалева А.Л. Риски опасных последствий существования в городах бесхозных и брошенных объектов незавершенного строительства // Вестник Евразийской науки. 2022. Т. 14. № 5. URL: <https://esj.today/PDF/27NZVN522.pdf>
22. Беляева Е.Л., Хлебникова Н.В., Маргулец А.В., Дари С.Б. Инжиниринговое сопровождение достройки проблемных объектов. Экспертное мнение // Academia. Архитектура и строительство. 2021. № 1. С. 161–169. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-1-161-169. EDN PCZSMH.

Поступила в редакцию 7 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 20 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 27 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Антонина Львовна Суздалева** — доктор биологических наук, профессор кафедры инженерной экологии и охраны труда; **Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ МЭИ)**; 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14; РИНЦ ID: 70718, Scopus: 6507201491, ORCID: 0000-0001-7673-1967; SuzdalevaAL@yandex.ru;

Михаил Юрьевич Слесарев — доктор технических наук, профессор кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 631310, Scopus: 6507608631, ResearcherID: AAA-8053-2019, ORCID: 0000-0003-4528-2817; Slesarev@mgsu.ru;

Ирина Юрьевна Яковлева — старший преподаватель кафедры инженерных изысканий и геоэкологии; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 998916, Scopus: 56260890500, ORCID: 0009-0005-9232-2457; yaha1977@mail.ru.

Вклад авторов:

Суздалева А.Л. — научное руководство, концепция исследования, структурирование методологии, подготовка итоговых выводов.

Слесарев М.Ю. — анализ материалов, подготовка итоговых выводов.

Яковлева И.Ю. — сбор исходных данных для написания научной работы, формирование структуры статьи согласно шаблону, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Orlova L.N. Some aspects of building insulation in solving the problem of long-term construction. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2020; 1:274-281. EDN MMCRKY. (rus.).
2. Pankratov O.E., Pankratov E.P. Problems of unfinished construction and ways to reduce it. *Economics of Construction*. 2020; 5(65):3-13. EDN BIVGHP. (rus.).
3. Gazimagomaeva A.A. Investments in real estate: problems of “long-term construction”. *Trends in the development of science and education*. 2022; 86-4:46-48. DOI: 10.18411/trnio-06-2022-148. EDN FLRWRX. (rus.).
4. Spelman W. Abandoned Buildings: Magnets for Crime. *Journal of Criminal Justice*. 1993; 21(5):481-495. DOI: 10.1016/0047-2352(93)90033-j
5. Accordino J., Johnson G. Addressing the Vacant and Abandoned Property Problem. *Journal of Urban Affairs*. 2000; 22(3):301-315. DOI: 10.1111/0735-2166.00058
6. Branas C.C., Cheney R.A., MacDonald J.M., Tam V.W., Jackson T.D., Ten Have T.R. A Difference-in-Differences Analysis of Health, Safety, and Greening Vacant Urban Space. *American Journal of Epidemiology*. 2011; 174(11):1296-1306. DOI: 10.1093/aje/kwr273
7. Shane J.M. Abandoned Buildings and Lots. *Center for Problem-Oriented Policing*. 2012; 64:80. URL: <https://popcenter.asu.edu/content/abandoned-buildings-and-lots-0>
8. Faur F., Apostu I.-M. The impact and the risk of abandoned buildings from Petroșani city on the urban environment. *Studia Universitatis Babeș-Bolyai Ambientum*. 2019; 64(2):11-30. DOI: 10.24193/subbambientum.2019.2.02
9. Joo H., Lee S. Spatial Analysis of Abandoned Houses and Their Influencing Factors in South Korea. *Applied Sciences*. 2021; 11(18):8576. DOI: 10.3390/app11188576
10. Cohen J. Abandoned Housing: Exploring Lessons from Baltimore. *Housing Policy Debate*. 2001; 12(3):415-448. DOI: 10.1080/10511482.2001.9521413
11. Holcomb J. Abandoning Places. *FBI Law Enforcement Bulletin*. 2008; 77(10):22-32. URL: <https://www.ojp.gov/ncjrs/virtual-library/abstracts/abandoning-places>
12. Han H.-S. The Impact of Abandoned Properties on Nearby Property Value. *Housing Policy Debate*. 2014; 24(2):311-334. DOI: 10.1080/10511482.2013.832350
13. Suzdaleva A.L. Biosocial emergencies. *Natural and Technical Sciences*. 2022; 8(171):114-115. DOI: 10.25633/ETN.2022.08.08. EDN DCHKRL. (rus.).
14. Suzdaleva A.L. Depressed areas: main types and mechanisms of formation. *Natural and Technical Sciences*. 2022; 8(171):116-117. DOI: 10.25633/ETN.2022.08.09. EDN TOSECA. (rus.).
15. Shikangalah R.N., Jeltsch F., Blaum N., Mueller E. A Review on Urban Soil Water Erosion. *Journal for Studies in Humanities and Social Sciences*. 2016; 5(1). URL: <http://hdl.handle.net/11070/1837>
16. Tang H., Shi P., Fu X. An Analysis of Soil Erosion on Construction Sites in Megacities Using Analytic Hierarchy Process. *Sustainability*. 2023; 15(2):1325. DOI: 10.3390/su15021325
17. Isola F., Lai S., Leone F., Zoppi C. Land Take and Landslide Hazard: Spatial Assessment and Policy

Implications from a Study Concerning Sardinia. *Land*. 2023; 12(2):359. DOI: 10.3390/land12020359

18. Sergeev E.M. Engineering geology — the science of the geological environment. *Engineering Geology*. 1979; 1:1-9. URL: https://geoenv.ru/materials/sergeev_disk_2/22_%D0%B8%D0%B3-1979-1.pdf?ysclid=li64eomvda127305369 (rus.).

19. Suzdaleva A.L. *Second geology — science about technogenic bodies of the lithosphere : monograph*. Moscow, RadioSoft, 2022; 584. URL: <https://ntsyst.ru/pages/geologysecond2.html> (rus.).

20. Suzdaleva A.L., Goryunova S.V., Beznosov V.N. Technogenic water accumulation ecological

problems and solutions. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2015; 4:107-113. EDN VBICOD. (rus.).

21. Yakovleva I.Y., Suzdaleva A.L. Risks of dangerous consequences of the existence of abandoned unfinished construction objects in cities. *The Eurasian Scientific Journal*. 2022; 14(5). URL: <https://esj.today/PDF/27NZVN522.pdf> (rus.).

22. Belyaeva E.L., Khlebnikova N.V., Margulets A.V., Dari S.B. Engineering support for completion of “problematic objects”. Engineering support tasks (expert opinion). *Academia. Architecture and Construction*. 2021; 1:161-169. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-1-161-169. EDN PCZSMH. (rus.).

Received June 7, 2023.

Adopted in revised form on September 20, 2023.

Approved for publication on September 27, 2023.

B I O N O T E S : **Antonina L. Suzdaleva** — Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor of the Department of Engineering Ecology and Labor Protection; **National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)**; 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; ID RSCI: 70718, Scopus: 6507201491, ORCID: 0000-0001-7673-1967; SuzdalevaAL@yandex.ru;

Mikhail Yu. Slesarev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction of Thermal and Nuclear Power Facilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 631310, Scopus: 6507608631, ResearcherID: AAA-8053-2019, ORCID: 0000-0003-4528-2817; Slesarev@mgsu.ru;

Irina Yu. Yakovleva — Senior Lecturer of the Department of Engineering Surveys and Geoecology; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 998916; Scopus: 56260890500; ORCID: 0009-0005-9232-2457; yaha1977@mail.ru.

Authors' contribution:

Antonina L. Suzdaleva — scientific guidance, research concept, structuring methodology, preparation of final conclusions.

Mikhail Yu. Slesarev — analysis of materials and preparation of final conclusions.

Irina Yu. Yakovleva — collection of initial data for writing a scientific work, formation of the structure of the article according to the template, text revision.

The authors declare no conflict of interest.

Классификация электрических котлов резистивного нагрева автономных водяных систем теплоснабжения

Алексей Леонидович Торопов

Инженерный центр «Апрель» (ИЦ «Апрель»); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Электрические котлы рассматриваются как важный элемент энергетического перехода от использования углеводородного топлива к возобновляемой энергии. Электрический котел — одно из популярных решений технологии Power-to-Heat, широко применяется в домохозяйствах для отопления водяными системами с радиаторами и низкотемпературными приборами отопления типа «теплый пол». Анализируется вариант джоулевого нагрева теплоносителя систем отопления, посредством которого при прохождении электрического тока по токопроводящему элементу выделяется тепло.

Материалы и методы. Объект исследования — варианты конструкций теплообменников генерации тепловой энергии с помощью резисторных нагревательных элементов нормального проводникового и полупроводникового типа. Рассмотрены различные варианты косвенного нагрева теплоносителя и контактов поверхности нагревательных элементов с теплоносителем. Используются методы сравнительного анализа и балльной оценки применимости различных конструкций.

Результаты. Представлена классификация электрических котлов по типам нагревательных резисторов, контакту, размещению нагревательных элементов в теплообменнике, форме теплообменника, варианту контакта нагревательного элемента с теплоносителем. Дан сравнительный комплексный анализ вариантов электрических тепловых генераторов.

Выводы. Результаты сравнительного анализа вариантов конструкции электрических котлов показывают перспективность использования в качестве нагревательных элементов полупроводниковых термисторов. По конструкции исполнения камеры генерации тепловой энергии с точки зрения компактности, удельной мощности и снижения условий выпадения осадков солей жесткости теплоносителя наиболее эффективными являются канальные пластинчатые электрические теплообменники.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электрический котел, резистивный нагрев, резистор, термистор, РТС-элемент, классификация котлов, трубчатый электрический нагреватель, теплообменник

Благодарности. Автор благодарит рецензентов за замечания по стилю изложения и научно-технической сути, способствующих более глубокому раскрытию темы научной работы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Торопов А.Л. Классификация электрических котлов резистивного нагрева автономных водяных систем теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 10. С. 1608–1616. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1608-1616

Автор, ответственный за переписку: Алексей Леонидович Торопов, toropov@aprilgroup.ru.

Classification of electric resistive heating boilers for autonomous water heating systems

Alexey L. Toropov

Engineering Center “April”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Electric boilers are considered as an important element of the energy transition from the use of hydrocarbon fuels to renewable energy. Electric boiler is one of the popular solutions of “Power-to-Heat” technology, widely used in households for heating with water systems with radiators and low-temperature heating devices of the “floor heating” type. The paper considers a variant of Joule heating of the coolant of heating systems, by means of which heat is released when an electric current passes through a conductive element.

Materials and methods. The object of the research is the variants of designs of heat exchangers for generating heat energy using resistor heating elements of normal conductor and semiconductor type. Various variants of indirect heating of the coolant and contacts of the surface of the heating elements with the coolant are considered. Methods of comparative analysis and scoring of the applicability of various designs are used in the work.

Results. The classification of electric boilers by types of heating resistors, by contact, by placement of heating elements in the heat exchanger, by the shape of the heat exchanger, by the variant heating element contact with the coolant is presented. A comparative comprehensive analysis of variants of electric heat generators is given.

Conclusions. The results of comparative analysis of design variants of electric boilers show the prospectively of using semiconductor thermistors as heating elements. According to the design of the heat energy generation chamber in terms

of compactness, power density and reduction of precipitation conditions for coolant stiffness, channel plate electric heat exchangers are the most effective.

KEYWORDS: electric boiler, resistive heating, resistor, thermistor, PTC element, boiler classification, tubular electric heater, heat exchanger

Acknowledgements. The author thanks the reviewers for their comments, both in terms of the style of presentation and the scientific and technical essence, which contribute to a deeper disclosure of the topic of scientific work.

FOR CITATION: Toropov A.L. Classification of electric resistive heating boilers for autonomous water heating systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(10):1608-1616. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1608-1616 (rus.).

Corresponding author: Alexey L. Toropov, toropov@aprilgroup.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы происходят значительные изменения в отношении целесообразности применения электричества в качестве источника тепловой энергии для автономных систем теплоснабжения домохозяйств — от полного отрицания до рекомендаций по замене централизованного теплоснабжения. В ряде случаев электрические котлы рассматриваются как важный элемент энергетического перехода от использования углеводородного топлива к возобновляемой энергии (ВЭ) [1, 2]. Первоначальное отрицание применения электричества в теплоснабжении связано с его отсутствием на планете в свободном виде. Электричество получается путем сжигания углеводородного топлива, ядерной реакции, преобразования энергии воды гидроэлектростанций, кинетической энергии ветра, энергии солнца и других видов первичной энергии. Средний КПД преобразования первичной энергии в электрическую довольно низок и составляет 30–35 % [3], что приводит к высокой стоимости электроэнергии для потребителя и склоняет к использованию централизованного теплоснабжения. Постоянный рост населения в целом и городского населения в частности ведет к увеличению площадей городской застройки и протяженности тепловых сетей. Тепловые электростанции и городские котельные имеют длительный срок службы и окупаемости, устарели и обладают низкой энергетической эффективностью [4–7]. Наблюдается повышение спроса на электро-энергию для различных сфер деятельности человека. Климат планеты теплеет. Техногенное воздействие человечества на природу планеты, в том числе количество выбросов парниковых газов, увеличивается. Все это привело к изменению критериев оценки использования электричества для теплоснабжения домохозяйств. Технологии Power-to-Heat (PtH или P2H) относятся к оборудованию, в котором электрическая энергия генерирует тепло. P2H предлагает множество преимуществ для управления энергетическим переходом. Водяные P2H с применением избыточной переменной ВЭ позволяют аккумулировать и оптимизировать энергопотребление. С этими технологиями легко интегрируются тепловые насосы, солнечные тепловые коллекторы и другие устройства, использующие энергию возобновляемых источников [8, 9]. Электрический котел — одно из популярных решений P2H, широко применяется в домохозяйствах для отопления водяны-

ми системами с радиаторами и низкотемпературными приборами отопления типа «теплый пол». Данная технология выгодна из-за комфортной, бесшумной и безопасной работы устройств, низкой начальной стоимости, простоты обслуживания.

Теме использования электроэнергии для систем теплоснабжения посвящены работы [10–15]. В общем случае распределение потребления выделенной на домохозяйство электрической энергии носит иерархический характер. Норма 15 кВт·ч достаточна для комфортной жизнедеятельности в жилых помещениях до 100 м². Вопрос пикового кратковременного превышения выделенной мощности и срабатывания устройств автоматического отключения электрического питания домохозяйства решается установкой приоритетного распределения выделенной мощности [16].

Существует несколько способов нагрева теплоносителя электрическим током. Общая классификация применения электрических котлов для систем теплоснабжения представлена в публикации [17]. В настоящей работе рассматривается только вариант джоулевого (резистивного, омического) нагрева, посредством которого при прохождении электрического тока по токопроводящему элементу выделяется тепло. В качестве теплового генератора в котлах используются электрические нагревательные элементы. Принцип функционирования нагревательных элементов резисторного типа заключается в следующем. На нагревательный элемент с сопротивлением R , Ом, подается электрический ток I , А. Выделение тепла происходит из-за сил сопротивления, которые задерживают электрический ток от свободного протекания через проводник. Нагрев пропорционален произведению электрического сопротивления проводника на квадрат электрического тока, протекающего через проводник $P \propto I^2 \cdot R$, и зависит от времени. В целях безопасности и исключения протекания тока через теплоноситель выделяемое тепло Q , Вт·ч, нагревает теплоноситель автономной системы теплоснабжения через промежуточный конструктивный элемент, отделяющий теплоноситель от нагревательного элемента, соответственно, выполняется косвенный нагрев теплоносителя. Форма нагревательного элемента может быть произвольная. По типу нагрева теплоносителя данные котлы относятся к электрическому резистивному косвенному нагреву теплоносителя. Наиболее распространенная конструкция

резисторного нагревательного элемента — трубчатый нагревательный элемент, состоящий из тонкой нихромовой (80 % Ni, 20 % Cr) или фехральной проволоки, свитой в спираль. Фехраль представляет собой железный сплав с добавками меди, марганца, алюминия, титана и других металлов. В открытом виде удельная температура работы: фехральная спираль выдерживает максимальный разогрев до 1400 °С, спирали из нихрома до 1200 °С. Корпус нагревательного элемента — медь, нержавеющая сталь или керамика [18, 19]. Наполнитель, отделяющий корпус от спирали нагревательного элемента, — периклаз, минерал, состоящий из оксида магния, иногда с примесями оксида железа, оксида марганца и оксида цинка. Керамические изоляторы, установленные по концам трубки, исключают контакт корпуса с контактными крепежными элементами спирали. Форма нагревательного элемента может быть произвольная.

Цель работы — представить наиболее полную классификацию электрических котлов автономных водяных систем теплоснабжения, использующих принцип джоулевого нагрева теплоносителя; выполнить сравнительный анализ приведенных конструкций генерации тепловой энергии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являются варианты конструкций теплообменников генерации тепловой энергии с помощью резисторных нагревательных элементов нормального проводникового и полупроводникового типов. Рассмотрены различные варианты косвенного нагрева теплоносителя и контактов поверхности нагревательных элементов с теплоносителем. Применены методы сравнительного анализа и балльной оценки применимости различных конструкций нагревательных элементов, камер генерации тепловой энергии.

РЕЗУЛЬТАТЫ

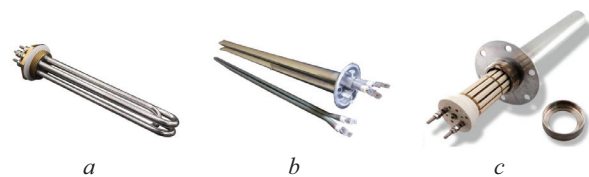


Рис. 1. Типовые конструкции трубчатых электрических нагревательных элементов: *a* — трубчатый нагревательный элемент «мокрого» типа; *b* — трубчатый нагревательный элемент «сухого» типа с «водяным» ТЭН; *c* — трубчатый нагревательный элемент «сухого» типа с «воздушным» ТЭН и керамическим сердечником

Fig. 1. Typical designs of tubular electric heating elements: *a* — wet-type tubular heating element; *b* — Tubular heating element of “dry” type with “water” heating element; *c* — Tubular heating element of “dry” type with “air” heating element and ceramic core

В классификации электрических котлов различаются два типа резисторных нагревательных элементов: «мокрый», у которого оболочка трубчатого электронагревателя (ТЭН) контактирует с теплоносителем, и «сухой», у которого оболочка ТЭН нагревает промежуточный элемент, контактирующий с теплоносителем [15]. На рис. 1 показаны типовые конструкции трубчатых электрических нагревательных элементов «мокрого» и «сухого» типов.

Конструкции «сухих» ТЭН, представленные на рис. 1, позволяют выполнить замену ТЭН без слива теплоносителя из системы теплоснабжения. ТЭН «мокрой» конструкции нагревают теплоноситель непосредственно своей оболочкой. ТЭН «сухой» конструкции вставляются в корпус (гильза), контактирующий с теплоносителем. Трубчатые электронагреватели для «сухих» конструкций могут быть «водяными» и «воздушными».

Проектирование размеров камеры генерации тепловой энергии электрического котла, в которой расположены ТЭН, базируется на условии отсутствия касания поверхности нагревательных элементов с поверхностью камеры. Рекомендуется обеспечить расстояние от нагревательного элемента до поверхности камеры не менее 5 мм. Второе условие — размещение в камере ТЭН необходимой мощности. Размер ТЭН определяется диаметром оболочки, как правило не менее 10 мм, и максимальной удельной плотностью нагрева поверхности ТЭН, равной для «мокрых» ТЭН 15 Вт/см². Плотность нагрева «сухих» ТЭН (гильз) не превышает 9 Вт/см² [19–21]. Скорость движения теплоносителя должна обеспечивать его нагрев в зоне контакта с поверхностью оболочки «мокрого» ТЭН или гильзы «сухого» ТЭН, независимо от его конструкции, с температурой, не превышающей 100 °С. Не должно быть застойных зон теплоносителя, контактирующих с нагревательными элементами.

По расположению конструкции нагревательных элементов в камере генерации тепловой энергии возможны два варианта. В первом — нагревающие поверхности расположены внутри объема камеры, в которой движется теплоноситель системы теплоснабжения (внутренний поверхностный нагрев); во втором — снаружи (наружный поверхностный нагрев). Варианты размещения нагревательных элементов представлены на рис. 2. В варианте наружного расположения ТЭН на поверхности камеры генерации тепловой энергии применяются только ТЭН «сухого» типа.

Форма камеры генерации может быть однообъемной, в которой размещаются ТЭН (рис. 2, *a*), и трубчатой в варианте размещения ТЭН вне камеры. В свою очередь, трубчатые камеры могут быть линейной и сложной формы. Вариант камеры генерации тепловой энергии в виде спиральной трубы с размещением ТЭН сложной формы в центре спирали с заполнением пространства между ними алюминиевым сплавом (материал, обладающий высокой теплопро-

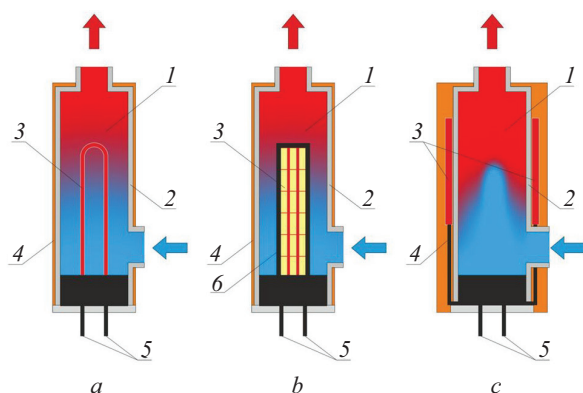


Рис. 2. Варианты размещения нагревательных элементов: *a* — «водяной» ТЭН размещен внутри объема камеры генерации тепловой энергии; *b* — «воздушный» ТЭН размещен внутри камеры генерации тепловой энергии; *c* — ТЭН размещен вне камеры генерации тепловой энергии; 1 — камера генерации тепловой энергии; 2 — корпус камеры; 3 — ТЭН; 4 — теплоизоляция; 5 — кабельный ввод; 6 — гильза «сухого» ТЭН

Fig. 2. Variants of heating elements placement: *a* — “water” heating element is located inside the volume of the heat energy generation chamber; *b* — “air” heating element is located inside the heat energy generation chamber; *c* — the heating element is located outside the heat energy generation chamber; 1 — heat energy generation chamber; 2 — the casing of the chamber; 3 — the heating element; 4 — thermal insulation; 5 — cable entry; 6 — “dry” heating element sleeve

водностью) приведен на рис. 3 [15]. В общем случае материал, заполняющий пространство между ТЭН и камерой генерации тепловой энергии, может быть любым, он должен обладать высокой теплопроводностью, в том числе в жидкой и сыпучей форме, а при использовании «воздушных» ТЭН — в виде газа.

Резисторные нагревательные элементы делятся на проводники (нормальные резисторы) и полупроводники (термисторы). В качестве проводников используется витая тонкая спиральная проволока из сплава никеля и хрома или фехралья. Термисторы — полупроводниковые приборы, электрическое сопротивление которых меняется в зависимости от температуры. В электрических котлах применяются термисторы с положительным (РТС — термисторы-позисторы (Positive Temperature Coefficient)) температурным коэффициентом. Для позисторов — с ростом температуры растет их сопротивление. РТС-термисторы изготовлены из легированной поликристаллической керамики на основе титаната бария [22, 23]. Низкое сопротивление достигается за счет легирования керамики материалами с более высокой валентностью. Часть ионов бария и титаната в кристаллической решетке замещается ионами более высокой валентности для получения определенного количества свободных электронов, которые делают керамику проводящей. Принципиальная разница нормальных

резисторов и термисторов косвенного нагрева заключается в следующем. Температурный коэффициент сопротивления резистора является относительно стабильной величиной. Выделяемая тепловая энергия резисторного нагревательного элемента увеличивается при увеличении тока. У термисторного нагревательного элемента при достижении заданной температуры, определенной химическим составом и физическими свойствами элемента, а также внешним тепловым давлением, происходит скачкообразное увеличение его электрического сопротивления, и как результат происходит скачкообразное уменьшение выделяемой тепловой мощности. Фактически термисторы — это саморегулируемые нагревательные элементы. Превышение расчетной выделяемой энергии у них исключено по их физическим характеристикам. Внешний вид термисторного нагревательного элемента представлен на рис. 4.

Графически описанная выше классификация генерации тепловой энергии с использованием джоулевого нагрева может быть представлена в следующем виде (рис. 5).

Преимущества и недостатки работы генераторов тепловой энергии с использованием джоулевого нагрева связаны со способностью конструкций противостоять образованию накипи. Она образуется на поверхности нагревательных элементов в случае их расположения внутри камеры генерации тепловой энергии и контактирует с теплоносителем. Накипь так-

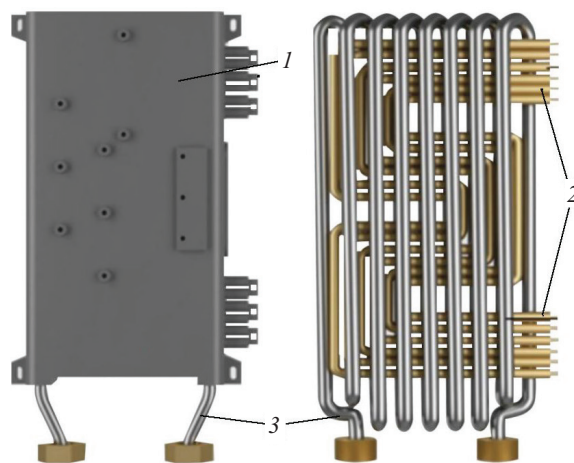


Рис. 3. Блок косвенного нагрева теплоносителя с «сухими» ТЭН, трубчатой спиральной камерой генерации тепловой энергии, алюминиевым корпусом — наполнителем для передачи тепловой энергии от ТЭН к поверхности камеры генерации тепловой энергии: 1 — алюминиевый корпус нагревательного блока; 2 — электрический нагревательный элемент; 3 — трубка теплоносителя

Fig. 3. Block of indirect heating of the heat carrier with “dry” heating elements, tubular spiral chamber for generating heat energy, aluminum case — filler for transferring heat energy from heating elements to the surface of the thermal energy generation chamber: 1 — aluminum body of the heating block; 2 — electric heating element; 3 — heat carrier tube

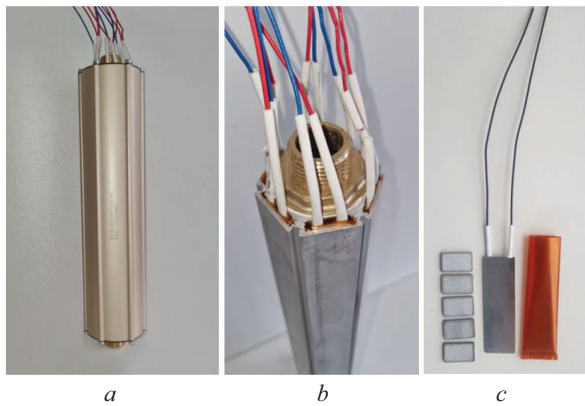


Рис. 4. Внешний вид нагревательного электрического блока (a); алюминиевый сердечник с шестью каналами для PTC-термисторных нагревательных элементов и центральным каналом теплоносителя (b); PTC-термисторы, электроды, токопроводящий, токоизоляционный чехол (c)

Fig. 4. External view of the heating electric block (a); Aluminum core with 6 channels for PTC thermistor heating elements and a central coolant channel (b); PTC thermistors, electrodes, thermally conductive, current-insulating cover (c)

же может образовываться на внутренней поверхности камеры, если нагревательный элемент не контактирует с теплоносителем, а нагревает корпус камеры, или корпус, или промежуточное тело «сухого» ТЭН. Задачи выделения осадков в виде нерастворимых карбонатов натрия и магния под действием температуры особенно актуальны при подготовке горячей воды. При рассмотрении котлов с электрическим тепловым генератором для систем отопления вопросы выпадения осадков связаны с герметичностью отопительного контура, диффузией кислорода через стенки труб и исключением

перегрева и закипания теплоносителя в тепловом генераторе. Полностью исключить выпадение осадков солей жесткости в электрических отопительных системах сложно. Основными факторами, влияющими на интенсивность выпадения осадков, служат температура поверхности, генерирующей тепло, и скорость движения теплоносителя. Чем ниже температура и выше скорость движения теплоносителя, тем меньше интенсивность образования осадков на поверхности камеры генерации тепловой энергии электрического котла [24, 25]. Эти показатели будут заложены в сравнительный анализ вариантов конструкций электрических котлов. Ключевым фактором оценки является срок службы нагревательных резисторных элементов. У нормальных резисторов температурный коэффициент сопротивления резистора является относительно стабильной величиной. Выделяемая тепловая энергия резисторного нагревательного элемента увеличивается при увеличении тока. Конструкции нагревательных резисторных элементов имеют предельную интенсивность рассеивания тепловой энергии — порог, до которого никаких трансформаций в деталях нагревательных элементов не происходит. При таких свойствах нагревательных элементов важно не допускать превышения порогов тепловой нагрузки, чтобы предотвратить разрушение нагревательного элемента. Интенсивность рассеивания тепловой энергии нормального резисторного элемента определяется расчетной скоростью движения теплоносителя и величиной теплоотдачи поверхности нагревательного элемента, если он контактирует с теплоносителем. При снижении скорости движения теплоносителя или снижении интенсивности теплоотдачи из-за образования накипи на поверхности генерации тепла срок службы нормального резисторного элемента

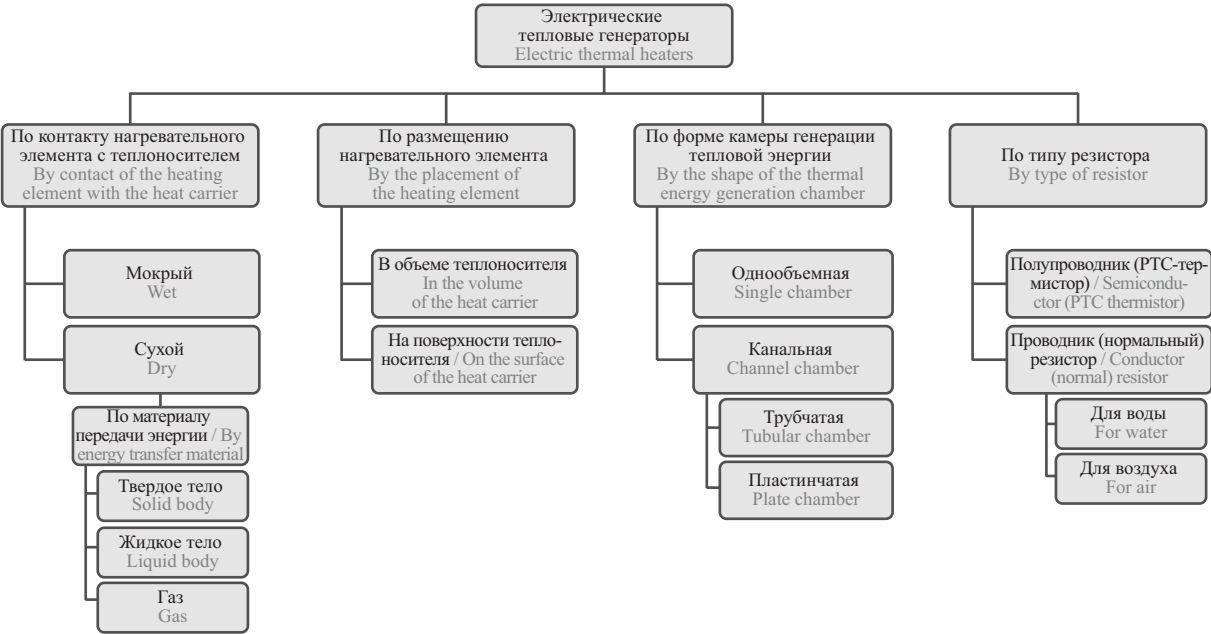


Рис. 5. Классификация устройств генерации тепловой энергии с использованием способа джоулевого нагрева теплоносителя

Fig. 5. Classification of devices for generating heat energy using the method of Joule heating of the heat carrier

сокращается. В случае значительных отклонений указанных параметров от расчетных произойдет его разрушение. При термисторном нагревательном элементе, когда достигается заданная температура, определенная химическим составом и физическими свойствами элемента, происходит скачкообразное увеличение его омического сопротивления. Термисторные нагревательные элементы обладают эффектом термостатирования. Разрушение данных элементов в электрических котлах от перегрева исключено.

Все конструкции резистентного нагрева теплоносителя в камере генерации тепловой энергии имеют высокий коэффициент энергетической эффективности во всем диапазоне изменения тепловой мощности, равный 0,95–0,99 [26, 27]. Потери 1–3 % зависят от наличия и качества теплоизоляционного кожуха камеры генерации тепловой энергии; 1–1,5 % потерь связаны с потерями на системе управления, внутренней гидравлической обвязке и циркуляции теплоносителя.

В общем виде преимущества электрических котлов с джоулевым нагревом теплоносителя заключаются в:

- простоте конструкции нагревательного элемента, массовом характере производства, низкой стоимости;
- компактности, легкости монтажа и эксплуатации;
- возможности регулирования мощности в полном диапазоне изменения тепловой нагрузки;
- высоком коэффициенте энергетической эффективности преобразования электрической энергии в тепловую — 0,95–0,99.

Недостатки систем косвенного нагрева теплоносителя резисторными нагревательными приборами:

- основаны на использовании электрической энергии. В ходе оценки углеродного следа при работе требуется учитывать коэффициенты трансформации первородного источника энергии в электрическую;
- ограниченный срок службы нормальных резисторных нагревательных элементов, связанный с материалами изготовления, конструкцией, интенсивностью работы;
- образование на поверхности нагревательного элемента отложений солей жесткости, значительно снижающих эффективность нагрева теплоносителя и уменьшающих срок службы нагревательного элемента;
- тепловая инерционность нагревательных элементов, приводящая к сложности в управлении тепловой нагрузкой;
- возможность возгорания нормальных резисторных устройств теплоснабжения и объемных деформаций при авариях в нештатных режимах работы.

В сравнительном анализе конструкций электрических котлов с использованием джоулевого электрического нагрева теплоносителя рассмотрим варианты: А — объемная камера с «мокрым» ТЭН с нормальным резистором; Б — объемная камера с «сухим» нормальным ТЭН водяного типа; В —

объемная камера с «сухим» нормальным ТЭН воздушного типа; Г — канальная трубчатая камера с «сухим» нормальным ТЭН водяного типа, алюминиевым телом передачи тепловой энергии от ТЭН к трубе теплоносителя; Д — канальная пластинчатая камера с термисторными нагревательными элементами полупроводникового типа. Применим балльную систему сравнения с максимальным значением 10 баллов по каждому показателю. Рассматриваем электрический котел для индивидуальной автономной системы отопления, мощностью 12 кВт·ч. Гидравлический контур котла, расширительный бак, циркуляционный насос, корпус, алгоритм работы в рассмотрении не участвуют и приняты одинаковыми по конструкции и стоимости. В качестве показателей принимаются:

- стоимость нагревательного элемента, 1кВт — I;
- удельные по мощности габариты камеры генерации тепловой энергии, кВт/дм³ — II;
- срок службы нагревательного элемента, циклов нагрузки, часов работы — III;
- возможность и простота замены отдельного нагревательного элемента, время замены — IV;
- образование накипи на поверхности нагревательных элементов или образование накипи на поверхности камеры генерации тепловой энергии — возможность превышения температуры 100 °С, скорость движения теплоносителя — V;
- возможность разрушения нагревательного элемента при нарушении расчетных параметров работы системы отопления, наличие критического порога теплового рассеивания — VI.

Методика определения значений параметра основана на сравнении с лучшим показателем в группе, значение которого принимается равным 10 баллов. Результаты сравнения представлены в таблице.

Наибольшее количество баллов получила конструкция Д — канальная пластинчатая камера с термисторными нагревательными элементами полупроводникового типа, наименьшее А — объемная камера с «мокрым» ТЭН с нормальным резистором. Это обусловлено следующими причинами.

Вероятность выпадения осадков в виде солей жесткости максимальна у классических конструкций объемной камеры нагрева теплоносителя с «мокрым» трубчатым нагревательным элементом. Температура поверхности оболочки ТЭН — максимальная из всех рассматриваемых случаев, а скорость движения теплоносителя — минимальная. Системы автоматического регулирования электрических котлов данного типа отслеживают температуру теплоносителя на выходе из камеры генерации тепловой энергии. Интенсивность теплоотдачи тепловой энергии с поверхности оболочки ТЭН не отслеживается. При отличии гидравлического сопротивления контура циркуляции от расчетного вероятность образования накипи на поверхности оболочки ТЭН усиливается. Снижение теплоотдачи поверхности ТЭН приводит к снижению срока

Сравнительные показатели конструкции электрических котлов резистентного типа
Comparative indicators of the construction of electric boilers of the resistant type

Вариант конструкции Construction variant	Показатели / Indicators						Баллы / Points
	I	II	III	IV	V	VI	Сумма баллов Sum of points
A	8	7	2	5	3	3	28
Б / B	5	7	2	10	5	4	33
В / C	2	6	2	10	6	6	32
Г / D	8	8	2	0	8	8	34
Д / E	10	10	10	3	10	10	53

службы, перегреву и разрушению нормального резистентного нагревательного элемента.

При использовании полупроводниковых термисторных нагревательных элементов возможность их перегрева и разрушения исключена их физическими свойствами. Керамическая основа элементов практически не имеет ограничений по сроку службы. Скорость движения теплоносителя по каналам пластинчатого теплообменника — максимальная из рассматриваемых конструкций. Температура поверхности нагрева теплоносителя не бывает выше 85 °С, тепловая инерционность термисторов — низкая. Удельная объемная мощность теплового генератора достигает 15 кВт/дм³. Условия возникновения осадков в виде солей жесткости — минимальные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены классификация и сравнительный анализ современных электрических тепловых генера-

торов автономных водяных систем отопления, использующих принцип джоулевого нагрева теплоносителя. Все конструкции резистентного нагрева теплоносителя в камере генерации тепловой энергии имеют высокий коэффициент энергетической эффективности во всем диапазоне изменения тепловой мощности, равный 0,95–0,99. Основными моментами, определяющими преимущества конструктивных решений электрических тепловых генераторов, являются: срок службы нагревательных элементов, температура поверхности контакта нагревательного элемента с теплоносителем, скорость движения теплоносителя в зоне нагрева.

Результаты сравнительного анализа вариантов конструкции электрических котлов показывают перспективность использования в качестве нагревательных элементов полупроводниковых термисторов. По конструкции исполнения камеры генерации тепловой энергии перспективны каналные пластинчатые электрические теплообменники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bloess A., Schill W.P., Zerrahn A. Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials // Applied Energy. 2018. Vol. 212. Pp. 1611–1626. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.073

2. Pieper C. Transformation of the German energy system — Towards photovoltaic and wind power Technology Readiness Levels 2018 : PhD Dissertation. Technische Universität Dresden, 2018. 264 p.

3. Стертюков К.Г., Стародубцева О.А. Проблемы внедрения новых технологий и технических средств с целью увеличения КПД в энергетической отрасли // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 25. С. 58–73. EDN UOAKVZ.

4. Яшин Д.Г., Псарев С.А. Анализ аварий на газотранспортной системе России // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. № 9.

5. Терёшкин А.А. Анализ аварийности на сетях газораспределения // Вестник магистратуры. 2021. № 5–6 (116). С. 63–65. EDN JURZHC.

6. Данилова А.С. Анализ аварийности сетей тепло- и газоснабжения // Вестник магистратуры. 2021. № 1–5 (112). С. 27–31. EDN QQGWFА.

7. Соколов Ю.И. Системный кризис жилищно-коммунального хозяйства России // Проблемы анализа риска. 2020. Т. 17. № 5. С. 10–25. DOI: 10.32686/1812-5220-2020-17-5-10-25. EDN EZIUH.

8. Nidek A.J. Heating Elements. URL: <https://farnam-custom.com/heating-elements?locale=en>

9. Taileb A. A comparative study of a direct current heating system and a gas furnace heating coil // WEENTECH Proceedings in Energy. 2019. Pp. 185–194. DOI: 10.32438/WPE.3019

10. Hegazy A.A., Diab M.R. Performance of an improved design for storage-type domestic electrical water-heaters // Applied Energy. 2002. Vol. 71. Issue 4. Pp. 287–306. DOI: 10.1016/S0306-2619(02)00006-5

11. Lee S., Jang D., Chung Y.S., Lee S. Cost-effective and highly efficient surface heating elements using high thermal conductive carbon fibers // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2020. Vol. 137. P. 105992. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105992

12. Пишеничников В. Коммерческие водонагреватели на предприятиях // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2011. № 6 (114). С. 40–43. EDN RHVZSV.
13. Горкин А.П. Энциклопедия «Техника». М. : Rosmen, 2006. 488 с.
14. Белавин Ю.А., Евстигнеев М.А., Чернявский А.Н. Трубчатые электрические нагреватели и установки с их применением. М. : Энергоатомиздат, 1989. 157 с.
15. Торопов А.Л. Энергетическая эффективность электрического котла с косвенным поверхностным резисторным нагревом теплоносителя // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 6. С. 927–934. DOI: 10.22227/19970935.2023.6.927-934
16. Торопов А.Л. Использование электрических котлов с иерархическим управлением нагрузкой для поквартирного теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 11. С. 1488–1498. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1488-1498
17. Maruf N.I., Morales-Espana G., Sijm J., Helisto N., Kiviluoma J. Classification, potential role, and modeling of power-to-heat and thermal energy storage in energy systems: A review // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Vol. 53. P. 102553. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102553
18. Пилипенко А.И. Промышленные электронагреватели // Промышленный электрообогрев и электроотопление. 2012. № 1. С. 28–34. EDN YWDUPQ.
19. Заяц А.Е., Корко В.С., Кустова Р.И. Электрические элементные нагреватели : учебное пособие. Минск : БГАТУ, 2011. 180 с.
20. Вадова Л.Ю. Способы и средства повышения эффективности работы трансформаторного нагревателя

- // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2022. № 8. С. 51–55.
21. Балашов С.М., Балашов С.С., Фролов А.А., Балашов М.С. Совершенствование трубчатых электронагревателей // Теплоэнергетика. 2005. № 2. С. 53–56. EDN HSCYPN.
22. Musat R., Helerea E. Characteristics of the PTC heater used in automotive HVAC systems // IFIP Advances in Information and Communication Technology. 2010. Pp. 461–468. DOI: 10.1007/978-3-642-11628-5_51
23. Chen Q.F., Yuan Z.X., Guo Z.Q., Zhao Y. Practical performance of a small PTC solar heating system in winter // Solar Energy. 2019. Vol. 179. Pp. 119–127. DOI: 10.1016/j.solener.2018.12.061
24. Колца Л.Н., Елистратова Ю.В., Семенов А.С. Влияние отложений солей жесткости на теплоотдачу отопительных приборов // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 7–2. С. 58–59. EDN SALRRV.
25. Гоненко Т.В., Хацевский В.Ф. Исследование процесса накипеобразования при электронагреве жидкостей // Система управления экологической безопасностью : сб. тр. XIV Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 242–248.
26. Жигулина И.С., Алифанова А.И. Особенности применения электрического отопления // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 8–1. С. 41–42. EDN QYYPOV.
27. Аллох М.Ю., Маликов С.А. Сравнение эффективности теплового насоса и электрического котла для теплоснабжения коттеджа // X Междунар. студ. науч. конф. Студенческий научный форум. 2018. URL: <https://scienceforum.ru/2018/article/2018007141>

Поступила в редакцию 15 мая 2023 г.

Принята в доработанном виде 17 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 20 июня 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Алексей Леонидович Торопов** — кандидат технических наук, генеральный директор — главный конструктор; **Инженерный центр «Апрель» (ИЦ «Апрель»);** 105122, г. Москва, Щелковское шоссе, д. 13; РИНЦ ID: 1030472, ORCID: 0000-0002-7457-6948; Toropov@aprilgroup.ru.

REFERENCES

1. Bloess A., Schill W.P., Zerrahn A. Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials. *Applied Energy*. 2018; 212:1611-1626. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.073
2. Pieper C. *Transformation of the German energy system — Towards photovoltaic and wind power Technology Readiness Levels 2018 : PhD Dissertation*. Technische Universität Dresden, 2018; 264.
3. Stertyukov K.G., Starodubtseva O.A. Problems of introduction of new technologies and technical tools to increase efficiency in the energy sector. *PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems*. 2018; 25:58-73. EDN UOAKVZ. (rus.).
4. Yashin D.G., Psarev S.A. Analysis of accidents in the gas transmission system of Russia. *Fire Safety: Problems and Prospects*. 2018; 9. (rus.).
5. Tereshkin A.A. Analysis of accidents on gas distribution networks. *Bulletin of the Magistracy*. 2021; 5-6(116):63-65. EDN JURZHC. (rus.).
6. Danilova A.S. Analysis of the accident rate of heat and gas supply networks. *Bulletin of the Magistracy*. 2021; 1-5(112):27-31. EDN QQGWF. (rus.).

7. Sokolov Yu.I. Systemic crisis of housing and communal services in Russia. *Issues of Risk Analysis*. 2020; 17(5):10-25. DOI: 10.32686/1812-5220-2020-17-5-10-25. EDN EZIUIH. (rus.).

8. Nidek A.J. *Heating Elements*. URL: <https://farnam-custom.com/heating-elements?locale=en>

9. Taileb A. A comparative study of a direct current heating system and a gas furnace heating coil. *WEENTECH Proceedings in Energy*. 2019; 185-194. DOI: 10.32438/WPE.3019

10. Hegazy A.A., Diab M.R. Performance of an improved design for storage-type domestic electrical water-heaters. *Applied Energy*. 2002; 71(4):287-306. DOI: 10.1016/S0306-2619(02)00006-5

11. Lee S., Jang D., Chung Y.S., Lee S. Cost-effective and highly efficient surface heating elements using high thermal conductive carbon fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020; 137:105992. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105992

12. Pshenichnikov V. Commercial water heaters in factories. *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. 2011; 6(114):40-43. EDN RHVZSV. (rus.).

13. Gorkin A.P. *Encyclopedia "Equipment"*. Moscow, Rosmen, 2006; 488. (rus.).

14. Belavin Yu.A., Evstigneev M.A., Chernyavskiy A.N. *Tubular electric heaters and installations with their application*. Moscow, Energoatomizdat, 1989; 160. (rus.).

15. Toropov A.L. Energy efficiency of an electric boiler with indirect surface resistive heating of the heat carrier. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(6):927-934. DOI: 10.22227/19970935.2023.6.927-934 (rus.).

16. Toropov A.L. Using electric boilers with hierarchical load control systems to supply heat to apartments. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(11):1488-1498. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1488-1498 (rus.).

17. Maruf N.I., Morales-Espana G., Sijm J., Helisto N., Kiviluoma J. Classification, potential role, and modeling of power-to-heat and thermal energy stor-

age in energy systems: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022; 53:102553. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102553

18. Pilipenko A.I. Industrial electrical heaters. *Industrial Electric Heating and Electric Heating*. 2012; 1:28-34. EDN YWDUPQ. (rus.).

19. Zayats A.E., Korko V.S., Kustova R.I. *Electric elemental heaters : a manual*. Minsk, BGATU, 2011; 180. (rus.).

20. Vadova L.Yu. Methods and means of improving the efficiency of the transformer heater. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2022; 8:51-55. (rus.).

21. Balashov S.M., Balashov S.S., Frolov A.A., Balashov M.S. Improving tubular electrical heaters. *Thermal Engineering*. 2005; 2:53-56. EDN HSCYPN. (rus.).

22. Musat R., Helerea E. Characteristics of the PTC heater used in automotive HVAC systems. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. 2010; 461-468. DOI: 10.1007/978-3-642-11628-5_51

23. Chen Q.F., Yuan Z.X., Guo Z.Q., Zhao Y. Practical performance of a small PTC solar heating system in winter. *Solar Energy*. 2019; 179:119-127. DOI: 10.1016/j.solener.2018.12.061

24. Koltsa L.N., Elistratova Yu.V., Seminenko A.S. Influence of deposits of hardness salts on the heat transfer of heating devices. *Modern science-intensive technologies*. 2014; 7-2:58-59. EDN SALRRV. (rus.).

25. Gonenko T.V., Khatsevskiy V.F. Study of the process of scale formation during electric heating of liquids. *Environmental safety management system : proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference*. 2020; 242-248. (rus.).

26. Zhigulina I.S., Alifanova A.I. Features of the use of electric heating. *Modern science-intensive technologies*. 2013; 8-1:41-42. EDN QYYPOV. (rus.).

27. Allok M.Yu., Malikov S.A. Comparison of the efficiency of a heat pump and an electric boiler for heating a cottage. *X International Student Scientific Conference. Student Scientific Forum*. 2018. URL: <https://scienceforum.ru/2018/article/2018007141> (rus.).

Received May 15, 2023.

Adopted in revised form on May 17, 2023.

Approved for publication on June 20, 2023.

BIONOTES: Alexey L. Toropov — Candidate of Technical Sciences, General Director — Chief Designer; **Engineering Center "April"**; 13 Schelkovskoe shosse, Moscow, 105122, Russian Federation; ID RSCI: 1030472, ORCID: 0000-0002-7457-6948; Toropov@aprilgroup.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 628.355

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1617-1626

Алгоритм проведения обследований систем холодного и горячего водоснабжения жилых зданий

Николай Алексеевич Макиша, Валентин Александрович Чухин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время существует большое разнообразие методов диагностики и мониторинга состояния трубопроводных систем с разным набором оборудования для решения широкого круга задач. Однако эти методы не используют для систем внутреннего водоснабжения из-за ограничений по диаметрам труб и малой доступности коммуникаций.

Материалы и методы. Для оценки коррозионной активности воды и определения возможности выделения карбоната кальция можно применять индексы Ланжелье, Ризнера, Сноинка-Джексона и др. При проведении наблюдения за системами водоснабжения с признаками коррозии с помощью электронного микроскопа обнаружено, что в составе коррозионного осадка содержится большое количество цинка и в некоторых случаях меди. Суть предложенного способа заключается в том, что предварительно подготовленный стальной индикаторный образец, вырезанный из трубы без покрытия, помещали в емкость под струю холодной или горячей воды в исследуемой системе водоснабжения, выполненной из стальных оцинкованных труб (в том числе включающую содержащую медь арматуру и теплообменники), выдерживали образец под струей 3–4 ч до образования на поверхности прочно прикрепленных продуктов коррозии (осадка).

Результаты. Свищи были обнаружены на горизонтальных участках, поворотах, в местах сварки трубопроводов. При параллельной прокладке труб в горизонтальной плоскости для присоединения к стоякам необходимо обходить находящиеся рядом трубы, это приводит к появлению U-образных или П-образных обводов горизонтально проложенных труб. Наиболее очевидной причиной аномально быстрой коррозии в горизонтально расположенных трубопроводах с U-образной схемой присоединения стояков является низкая скорость движения воды. При низкой скорости воды в трубах с изменением направления движения воды с горизонтального на вертикальное и вниз на горизонтальном участке магистрального трубопровода будет накапливаться воздух, в то время как на горизонтальном участке, идущем к стояку, накапливается осадок.

Выводы. Опыт обследования систем водоснабжения зданий показывает, что в первую очередь следует выполнять оценку влияния качества воды на коррозию трубопроводов по индексам стабильности, которые в ряде случаев могут дать ответ на возможность возникновения аномально быстрой коррозии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обследование внутренних систем водоснабжения, аномально быстрая коррозия, качество питьевой воды, оцинкованные трубы, индикаторы коррозии, электронная микроскопия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Макиша Н.А., Чухин В.А. Алгоритм проведения обследований систем холодного и горячего водоснабжения жилых зданий // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 10. С. 1617–1626. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1617-1626

Автор, ответственный за переписку: Николай Алексеевич Макиша, MakishaNA@mgsu.ru.

Survey algorithm for cold and hot water supply systems of residential buildings

Nikolay A. Makisha, Valentin A. Chukhin

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

ABSTRACT

Introduction. Currently, there is a wide variety of methods for monitoring the condition of pipeline systems which require a different set of equipment. However, these methods are not applied for internal water supply systems due to restrictions on pipe diameters and complicated availability of communications

Materials and methods. To assess the corrosion activity of water and determine the possibility of calcium carbonate release, various indices can be used: Langelier, Risner, Snow-Jackson, etc. When monitoring water supply systems with signs of corrosion using an electron microscope, it was found that the composition of the corrosive sediment contains a large amount of zinc, and, in some cases, copper. The essence of the proposed method is that a preliminary prepared steel indicator sample cut from an uncoated pipe was placed in a container under a stream of cold or hot water in the investigated

water supply system made of galvanized steel pipes (including copper-containing fittings and heat exchangers), the sample was kept under the stream for 3–4 hours until the formation of surfaces of firmly attached corrosion products (sediment).

Results. Fistulas were found on horizontal sections, on turns, in places where pipelines are welded. When laying pipes in parallel in a horizontal plane, it is necessary to bypass the pipes located next to the risers, which leads to the appearance of U-shaped or U-shaped contours of horizontally laid pipes. The most obvious reason for abnormally rapid corrosion in horizontally arranged pipelines with a U-shaped connection scheme of risers is the low speed of water movement. At low velocity of water flow in pipes with a change in the direction of water movement from horizontal to vertical and down, air will accumulate on the horizontal section of the main pipeline, while sediment will accumulate on the horizontal section going to the riser.

Conclusions. The experience of the survey of water supply systems of buildings shows that, first of all, it is necessary to assess the impact of water quality on corrosion of pipelines according to stability indices, which in some cases can provide an answer to the possibility of abnormally rapid corrosion.

KEYWORDS: inspection of internal water supply systems, abnormally fast corrosion, drinking water quality, galvanized pipes, corrosion indicators, electron microscopy, energy dispersive X-ray spectroscopy

FOR CITATION: Makisha N.A., Chukhin V.A. Survey algorithm for cold and hot water supply systems of residential buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(10):1617-1626. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1617-1626 (rus.).

Corresponding author: Nikolay A. Makisha, MakishaNA@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Цель диагностики состояния трубопроводов внутренних систем хозяйственно-питьевого водопровода — обеспечение их длительной безаварийной эксплуатации и, соответственно, бесперебойная подача воды потребителям [1, 2]. В связи с этим основной задачей технической диагностики систем, особенно в случае их частого отказа на раннем этапе эксплуатации, является выявление потенциально опасных участков трубопроводов, определение степени их поражения и необходимых мер для проведения восстановительных работ^{1, 2}.

Обследование систем водоснабжения проводилось на различных объектах, расположенных в Москве и Московской области, в Рязани и других населенных пунктах Российской Федерации путем визуального осмотра систем водоснабжения, анализа проб воды из систем холодного (ХВС) и горячего водоснабжения (ГВС), изучения фрагментов труб со следами коррозии, определения параметров работы системы водоснабжения и их сравнения с проектными решениями. Анализы воды, изучение фрагментов труб осуществлялись как в лаборатории кафедры водоснабжения и водоотведения НИУ МГСУ с применением современного аналитического оборудования, в том числе электронной микроскопии, так и в специализированных лабораториях.

В работах [3, 4] проанализированы некоторые причины, приводящие к ускоренной коррозии стальных оцинкованных труб в системах ГВС. К ним относятся: качество воды; высокая температура; неравномерность распределения цинкового покрытия по внутренней поверхности трубы; наличие кислорода и углекислого газа в воде, поступающей в систему ГВС; утечки тока. Отмечены влияния особенностей конструкции запорной арматуры

и нарушения требований технического регламента по эксплуатации.

В настоящее время существует большое разнообразие методов диагностики и мониторинга состояния трубопроводных систем с разным набором оборудования для решения широкого круга задач [5–7]. Однако эти методы не используют для систем внутреннего водоснабжения из-за ограничений по диаметрам труб и малой доступности коммуникаций. На практике наиболее простым способом контроля за коррозией трубопроводов внутренних систем ХВС и ГВС служит отбор проб воды и измерение в них концентрации элементов, входящих в материал труб и поступающих в воду в результате коррозии. Для стальных оцинкованных труб такие элементы — железо и цинк. Недостаток указанного способа заключается в незначительном увеличении концентрации измеряемого элемента в пробе воды, сопоставимом с погрешностью измерения концентрации этого элемента методами химического анализа. Тем не менее по совокупности некоторых показателей можно установить, может ли вода быть причиной появления аномально быстрой коррозии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценки коррозионной активности воды

С целью оценки коррозионной активности воды и определения возможности выделения карбоната кальция можно использовать различные индексы: Ланжелье, Ризнера, Сноинка-Джексона и др. [8]. Для расчета индексов необходимы следующие показатели: pH, измеренный при температуре 25 °С; солесодержание, мг/л; температура воды, °С; жесткость (Ca^{2+}) по карбонату кальция, мг/л, и щелочность, мг/л. В приведенном примере применялись индексы Ланжелье и Ризнера [9].

В табл. 1 представлены показатели качества воды для одного из обследованных авторами настоящего исследования объектов, которые свидетельствуют, что холодная вода, поступающая с систему ГВС, хотя и соответствует требованиям

¹ ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.

² ВСН 53–86(р). Правила оценки физического износа жилых зданий.

СанПиН 1.2.3685–21³ к питьевой воде, обладает чрезвычайно высокой коррозионной способностью, что подтверждается повышенным содержанием железа в циркуляционном контуре (1,0 мг/л).

Использование индикаторов коррозии

При проведении наблюдения за системами водоснабжения с признаками коррозии с помощью электронного микроскопа [3] обнаружено, что в составе коррозионного осадка содержится большое

количество цинка и в некоторых случаях меди. Приведенные выше наблюдения были положены в основу разработки нового способа идентификации коррозии [10]. Суть предложенного способа⁴ заключается в том, что предварительно подготовленный стальной индикаторный образец, вырезанный из трубы без покрытия, помещали в емкость под струю холодной или горячей воды в исследуемой системе водоснабжения, выполненной из стальных

³ СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

⁴ Патент RU № 2666574 С1. Способ идентификации коррозии стальных оцинкованных труб в системах водоснабжения / Чухин В.А., Андриянов А.П.; опубл. 11.09.2018.

Табл. 1. Результаты анализа водопроводной воды

Table 1. Results of water samples analysis

Наименование показателя, единица измерений Name of the indicator, unit of measurement	Норматив Standard	Номер пробы и место отбора Sample number and sampling location			Нормативный документ (НД) на методы исследования Normative document (ND) on research methods
		№ 1 ХВС, ввод No. 1 HVS, input	№ 2 ГВС, Т3 No. 2 DHW, T3	№ 3 ГВС, Т4 No. 3 DHW, T4	
Водородный показатель, pH, ед. Hydrogen index, pH, units	6–9	6,58	6,69	7,95	ФР.1.31.2005.01774 FR.1.31.2005.01774
Жесткость, ммоль-экв/л Hardness, mmol-eq/l	< 7	1,4	1,40	1,85	ГОСТ 31954–2012 ⁵ GOST 31954–2012
Кальций, ммоль-экв/л, (мг/л) Calcium, mmol-eq/l, (mg/l)	< 7 (140)	1,06 (21,2)	1,06 (21,2)	1,5 (30)	ГОСТ Р 57165–2016 ⁶ GOST R 57165–2016
Щелочность, ммоль-экв/л Alkalinity, mmol-eq/l	Не нормируется Not standardized	1,16	1,30	1,45	ГОСТ 31957–2012 ⁷ GOST 3195–2012
Цветность, град. Color, deg.	≤ 20	< 1	5,2	15	ГОСТ 31868–2012 ⁸ GOST 31868–2012
Мутность, ед. ЕМФ, мг/л Turbidity, units EMF, mg/l	≤ 2,6 (1,5)	Менее 1 Less than 1	2,1	10,7	ПНД Ф 14.1:2:3:4.213–05 ⁹ PND F 14.1:2:3:4.213–05
Железо общее, мг/л Total iron, mg/l	≤ 0,3	< 0,05	0,29	1,0	ГОСТ Р 57165–2016 ⁹ GOST R 57165–2016
Хлориды, мг/л Chlorides, mg/l	350	4,0	3,7	4,7	–
Солесодержание, мг/л Salt content, mg/l	≤ 1000	125	135	150	–
Индекс Ланжель* при t = 10 °С Langelier index* at t = 10 °С	–	–1,93	Тенденция к коррозии (–1) / Corrosion tendency (–1) Очень высокая коррозия (–2) / Very high corrosion (–2)		
Индекс Ризнера* при t = 10 °С Risner index* at t = 10 °С	–	10,44	Чрезвычайно высокая коррозия (+10) Extremely high corrosion (+10)		

Примечание: * — первые проявления аномально быстрой коррозии начали выявляться на объекте через 6 лет с начала эксплуатации.

Note: * — the first manifestations of abnormally rapid corrosion began to appear at the facility 6 years from the beginning operation.

⁵ ГОСТ 31954–2012. Вода питьевая. Методы определения жесткости.

⁶ ГОСТ Р 57165–2016. Вода. Определение содержания элементов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой.

⁷ ГОСТ 31957–2012. Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов.

⁸ ГОСТ 31868–2012. Вода. Методы определения цветности.

⁹ ПНД Ф 14.1:2:3:4.213–05. Методика измерений мутности проб питьевых, природных поверхностных, природных подземных и сточных вод турбидиметрическим методом по каолину и по формазину.

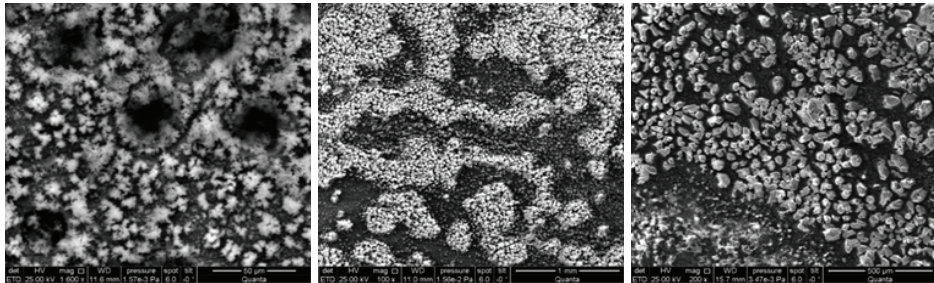


Рис. 1. Микрофотографии осадка на поверхности индикаторных образцов
Fig. 1. Microphotography of sediment on pipe sample surface

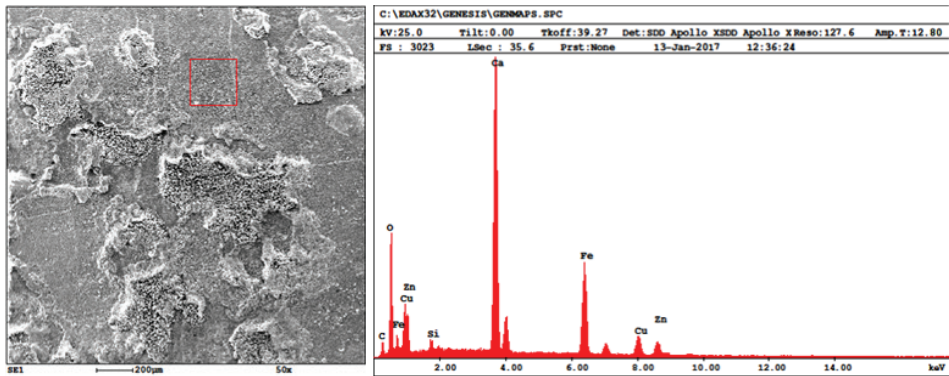


Рис. 2. Спектрограмма осадка на поверхности индикатора коррозии
Fig. 2. Spectrogram of sediment on pipe sample surface

Табл. 2. Состав осадка на поверхности индикатора коррозии
Table 2. Sediment contents on pipe sample surface

Элементы / Elements	C	O	Si	Ca	Fe	Cu	Zn
Доля по массе, % / Share by weight, %	6,24	32,94	1,19	26,66	19,09	7,62	6,27
Доля по атомной массе, % / Share by atomic mass, %	13,52	53,57	1,10	17,31	8,89	3,12	2,49

оцинкованных труб (в том числе включающую содержащие медь арматуру и теплообменники), выдерживали образец под струей 3–4 ч до образования на поверхности прочно прикрепленных продуктов коррозии (осадка). После этого индикаторный образец извлекали из емкости, высушивали и определяли состояние системы водоснабжения по результатам измерения элементного состава осадка на электронном сканирующем микроскопе с использованием метода энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Затем сравнивали результаты с фоновыми значениями, которые были определены после подготовки образцов. Заключение об интенсивности коррозии делали при превышении показателя по содержанию цинка в осадке на поверхности образца [11]. Испытания данного метода на различных объектах продемонстрировали хорошую корреляцию получаемых результатов количественного анализа осадка с реальным состоянием трубопроводов и степенью их коррозионного повреждения.

На рис. 1 представлены микрофотографии структуры осадка, образующегося на поверхности индикаторов в процессе коррозии. На рис. 2 показана спектрограмма осадка, а в табл. 2 приведен его химический

состав. Определение химического состава осадка на внутренней поверхности трубы выполнено с помощью сканирующего электронного микроскопа Quanta 250 FEI и энергодисперсионной спектроскопии EDAX.

По результатам анализа сделан вывод, что в системе ГВС протекает интенсивная коррозия, причем не только оцинкованных труб, но и теплообменника, на что указывает наличие меди в составе осадка. Содержание цинка в осадке до 1,5 % свидетельствует о незначительной коррозии системы ГВС, от 2 до 3 % — об умеренной коррозии, свыше 4 % — об интенсивной коррозии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Влияние на коррозию конструктивных параметров

Коррозия магистральных трубопроводов

На рис. 3 приведен фрагмент плана подвала с сетями ХВС и ГВС с указанием мест, где в течение четырех месяцев произошло 5 прорывов стальных оцинкованных трубопроводов системы ГВС с образованием свищей. Следует отметить, что все свищи образовались на трубопроводах Т3.1, подающих

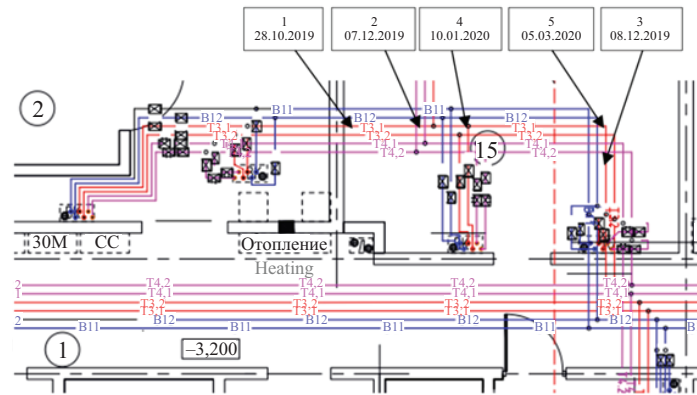


Рис. 3. Фрагмент плана подвала с магистральными трубопроводами систем холодного и горячего водоснабжения
Fig. 3. Fragment of the basement plan with main pipelines of cold and hot water supply systems



Рис. 4. Фотографии аварийных участков: *a* — присоединение стояков к магистральным трубопроводам в подвале; *b–d* — участки труб со свищами

Fig. 4. Photos of emergency sections: *a* — connection of risers to main pipelines in the basement; *b–d* — sections of pipes with fistulas

горячую воду в стояки первой зоны. Свищи образовались на участке трубопровода, проложенного параллельно основным магистралям.

Свищи были обнаружены на горизонтальных участках, поворотах, в местах сварки трубопроводов. На рис. 4 представлены фотографии с трубопроводами под потолком подвала на обследованном объекте. При параллельной прокладке труб в горизонтальной плоскости для присоединения к стоякам необходимо обходить находящиеся рядом трубы, что приводит к появлению U-образных или П-образных обводов горизонтально проложенных труб.

Наиболее очевидной причиной аномально быстрой коррозии в горизонтально расположенных трубо-

проводах с U-образной схемой присоединения стояков является низкая скорость движения воды. При низкой скорости воды в трубах с изменением направления движения воды с горизонтального на вертикальное и вниз (рис. 4, *c*) на горизонтальном участке магистрального трубопровода будет накапливаться воздух, в то время как на горизонтальном участке, идущем к стояку (рис. 4, *a*), будет накапливаться осадок. И в том, и в другом случае риск возникновения коррозии более высокий. В первом случае из-за разной концентрации кислорода, что приводит к появлению катода на внутреннем хорошо аэрированном участке поверхности горизонтальной трубы и, соответственно, анода на поверхности вертикального участка, с более низкой концентра-

цией кислорода. Первоначально коррозия протекает с разрушением цинкового покрытия на аноде, затем начинается коррозия стальной основы. Иллюстрацией приведенного объяснения может служить фотография на рис. 4, с. По данным, приведенным в статье [12], увеличение скорости потока от 0,19 до 0,45 м/с снижает скорость коррозии в 2,8 раза. Это связано с тем, что при скорости воды в трубах более 0,5 м/с пузырьки воздуха двигаются равномерно по всему сечению трубы, не задерживаясь и не создавая градиента концентрации кислорода по длине трубопровода. Когда скорость превышает 1 м/с, пузыри разбиваются на очень мелкие пузырьки. Получается подобие эмульсии из воды и воздуха. Пузыри воздуха в системе водоснабжения начинают разрушаться при скорости движения жидкости от 0,25 м/с. Если она ниже, пробки могут застаиваться в одних местах довольно долго¹⁰ [13]. Во втором случае осадок может инициировать развитие подшламовой коррозии.

Обеспечение скоростного режима в системе внутреннего водопровода — одно из требований норма-

тивных документов. В п. 5.6.6 СП 30.13330.2016¹¹ записано: «При расчете диаметров рекомендуемая скорость движения воды в трубопроводах 1,2 м/с. Максимальная скорость движения воды в трубопроводах внутренних сетей не должна превышать 1,5 м/с. Минимальная скорость воды в трубопроводах 0,2 м/с». Однако из последней редакции СП 30.13330.2020¹² (п. 8.26) требование о минимальной скорости движения воды было необоснованно удалено.

Коррозия стояков

Одним из наиболее подверженных коррозии элементов системы ГВС являются полотенцесушители, располагаемые на подающих стояках. Полотенцесушители даже в системах с благоприятной гидравликой имеют нормативный срок службы значительно ниже, чем трубопроводы. На рис. 5 приведены фотографии стояков в месте присоединения к полотенцесушителю (рис. 5, а) и фрагменты этих стояков со следами интенсивной коррозии (рис. 5, с). На рис. 5, b показана схема из рабочего

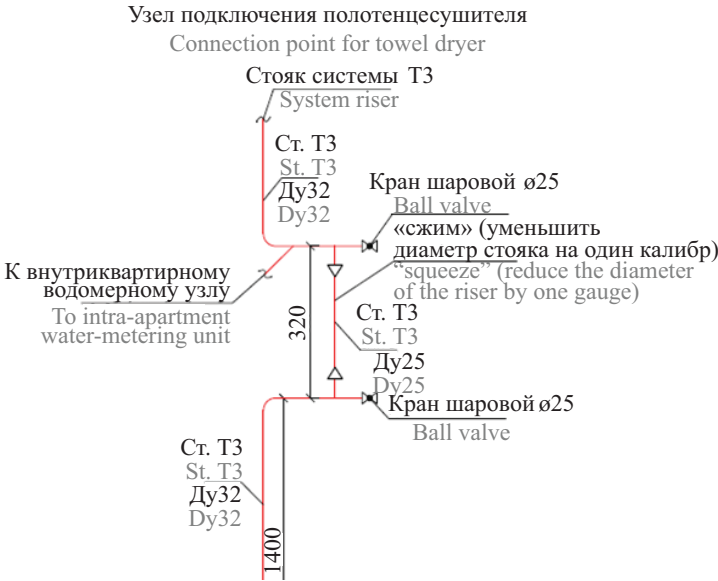
¹⁰ Воздух в системе горячего водоснабжения дома и трубах, его удаление и сброс. URL: <https://ventkam.ru/interesnye-statii/vozduh-v-sisteme-goryachego-vodosnabzheniya-doma-i-trubah-ego-udalenie-i-sbros>

¹¹ СП 30.13330.2016. СНиП 2.04.01–85*. Внутренний водопровод и канализация зданий.

¹² СП 30.13330.2020. СНиП 2.04.01–85*. Внутренний водопровод и канализация зданий.



а



б



с

Рис. 5. Фотографии фрагментов стояков с наличием интенсивной коррозии

Fig. 5. Photos of fragments of risers with the presence of intense corrosion

проекта, по которой должны быть смонтированы полотенцесушители на данном объекте.

В статье [14] были рассмотрены причины, приводящие к выходу из строя полотенцесушителей. На фотографии (рис. 5, с) видно, что труба в месте перехода с диаметра 32 на 25 мм изогнута, что свидетельствует об отсутствии компенсаторов на стояке или о защемлении труб в перекрытии. В данном случае отклонение от проектного решения вызвало аварийную ситуацию. Кроме того, выполнение перемычки с изменением диаметра на один сортамент было произведено при сварке. При этом шесть стыков на расстоянии менее 0,5 м привели к практически полному уничтожению цинкового покрытия, что в дальнейшем послужило развитию ускоренной коррозии и появлению свищей.

Влияние на коррозию гидравлического режима работы системы ГВС

Коррозия труб в новой системе водоснабжения начинается в момент заполнения водой. Коррозии подвергаются как цинковое покрытие, так и участки стальных труб и шаровых кранов без защитного покрытия. В результате в водопроводной воде появляется осадок [15]. Высокая скорость движения воды препятствует выпадению осадка, и продукты коррозии выносятся из системы во время использования воды потребителями [16]. Как было показано выше, низкая скорость движения воды является активатором коррозии. Низкая скорость движения воды в системе ГВС, как правило, характерна для периода заселения дома. Проведенные обследования показали, что во всех обследованных домах количество незастроенных квартир составляло от 80 до 50 %. Другая причина наличия низких скоростей — низкий расход воды в режиме циркуляции [17]. Это особенно характерно для систем, имеющих большую протяженность и большое количество стояков [18].

Оценка влияния на коррозию утечек тока

По утверждению авторов работы [19], в которой приведены результаты обследования систем отопления и горячего водоснабжения на объектах различного назначения в г. Москве, где наблюдалась коррозия трубопроводов и оборудования, одной из причин ускоренной коррозии трубопроводов в зданиях стали протекающие по ним токи промышленной частоты, связанные с нарушениями эксплуатации систем электроснабжения этих зданий.

В ходе проведенных измерений было зафиксировано, что по трубопроводам протекают переменные токи промышленной частоты 0,1–18,2 А.

Проверка системы водоснабжения на наличие токов утечки

В феврале 2020 г. в присутствии сотрудников управляющей компании в жилом доме, включающем четыре корпуса, проведены измерения токов, протекающих по проводам заземления трубопроводов ХВС в месте их присоединения к заземляющему контуру в помещениях насосной каждого корпуса. Измерения выполнялись прибором M266C, оснащенный токовыми клещами, позволяющими охватить трубы с условным диаметром до 32 мм. Результаты замеров приведены в табл. 3.

При проведении замеров на металлических участках стояков систем В1, Т3 и Т4 наличие токов утечки не обнаружено. Замеры осуществлялись в шахте, где размещались коллекторы этих систем. Технической возможности выявить источник тока при обследовании не было. Поскольку на стояках ГВС наличие токов утечки не зафиксировано, а в двух корпусах получены нулевые значения, версия о влиянии токов утечки на коррозию труб в качестве основной не рассматривалась.

Согласно расчетам [20], питтинги глубиной в 3 мм (эквивалентно толщине стенки трубы) и поверхностью 0,1 см² вызывают ток 23 мкА в течение одного года. В то же время разрушение труб с цинковым покрытием может длиться 1–3 года, поэтому влияние утечек тока необходимо рассматривать как одну из возможных причин ускоренной коррозии.

Мониторинг коррозии систем ГВС

Многочисленные обращения от управляющих компаний с просьбой о проведении обследования начали поступать в НИУ МГСУ после публикации статей о коррозии систем ГВС. Именно управляющие компании первыми получают информацию о неблагоприятной ситуации с инженерными системами здания. В тех случаях, когда управляющие компании не реагируют на обращения, жители имеют возможность обратиться в органы исполнительной власти и решить конкретные проблемы через интернет. В Москве таким интернет-порталом является «Наш город», в Московской области — «Добродел». Но эти интернет-сервисы не имеют возможности проводить обследования. Этот факт свидетельствует о том, что в организационной структуре строительной отрасли отсутствует орган, отвечающий за своевременное реагирование на жалобы населения на появление ржавой воды. Таким органом мог бы стать центр технической диагностики, наподобие Центра технической диагностики АО «Мосводоканал», контролирующей состояние наружных сетей и сооружений водопровода и кана-

Табл. 3. Результаты измерения силы переменного тока в системе заземления холодного водопровода

Table 3. Results of measuring the AC power in the grounding system of cold water supply

Показатель / Index	Номер корпуса / Case number			
	1	2	3	4
Сила тока, А Current strength, A	0,1	0	0	0,24/0,69*

Примечание: * — измерения проводились в месте присоединения заземляющего провода к щитку.

Note: * — measurements were carried out at the attachment point connection of the grounding wire to the shield.

лизации в г. Москве и обладающий техническими возможностями и компетенциями для выполнения обследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Опыт обследования систем водоснабжения зданий показывает, что в первую очередь следует проводить оценку влияния качества воды на коррозию трубопроводов по индексам стабильности, которые в ряде случаев могут дать ответ на возможность возникновения аномально быстрой коррозии.

Следующим фактором, который необходимо учитывать при подготовке заключения, является нарушение

или отклонение от норм проектирования и эксплуатации. Сюда относится в большей степени неравномерное распределение воздуха по длине трубопровода, вызванное наличием участков, на которых из-за низкой скорости движения воды происходит расслоение потоков воды и воздуха, содержащего кислород, приводящее к возникновению разности потенциалов на различных участках труб, а также чрезмерное применение сварки на небольших участках трубопровода.

Проведенные обследования свидетельствуют о том, что наличие токов утечки может быть одной, но не единственной, причиной возникновения аномально быстрой коррозии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чухин В.А., Андрианов А.П. Анализ причин коррозии оцинкованных труб в системах ГВС // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2018. № 1. С. 54–58.
2. Liu S., Wu H., Zhao Q., Liang Z. Corrosion failure analysis of the heat exchanger in a hot water heating boiler // Engineering Failure Analysis. 2022. Vol. 142. P. 106847. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106847
3. Song X., Zhang G., Zhou Y., Li W. Behaviors and mechanisms of microbially-induced corrosion in metal-based water supply pipelines : a review // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 895. P. 165034. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165034
4. Li K., Sun L., Cao W., Chen S., Chen Z., Wang Y., Li W. Pitting corrosion of 304 stainless steel in secondary water supply system // Corrosion Communications, 2022. Vol. 7. Pp. 43–50. DOI: 10.1016/j.corcom.2021.11.010
5. Кюберис Э.А., Васильев А.Л. Повышение надежности сетей водоснабжения как фактор стабильного развития городов // Приволжский научный журнал. 2017. № 4 (44). С. 60–67.
6. Андрианов А.П., Макиша Н.А., Чухин В.А. Коррозия запорной арматуры в системах ГВС // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2018. № 6. С. 30–34.
7. Отставнов А.А., Харьков В.А. К проблеме рейтингования напорных труб для внутренних трубопроводов // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2013. № 8 (140). С. 12–19.
8. Baloitcha G.M.P., Mayabi A.O., Home P.G. Evaluation of water quality and potential scaling of corrosion in the water supply using water quality and stability indices: A case study of Juja water distribution network, Kenya // Heliyon. 2022. Vol. 8. Issue 3. P. e09141. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09141
9. Orlikowski J., Zielinski A., Darowicki K., Krakowiak S., Zakowski K., Slepki P. et al. Research on causes of corrosion in the municipal water supply system // Case Studies in Construction Materials. 2016. Vol. 4. Pp. 108–115. DOI: 10.1016/j.cscm.2016.03.001
10. Фрог Б.Н., Первов А.Г. Водоподготовка. М. : Изд-во АСВ, 2015. 512 с.
11. Васильев Е., Азаров В., Гевлич Д., Гевлич С., Васильев К., Мирзонов М. Трубы и язвы // Энергонадзор. 2015. № 8 (72). С. 24–25.
12. Польшин В.И. Цинк для защиты от коррозии // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2021. № 2 (265). С. 35–40.
13. Андрианов А.П., Чухин В.А. Идентификация коррозии оцинкованных труб в системе водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 9. С. 39–44.
14. Ryl J., Wysocka J., Darowicki K. Determination of causes of accelerated local corrosion of austenitic steels in water supply systems // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 64. Pp. 246–252. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.058
15. Григорьев О., Петухов В., Соколов В. Неисправности систем электроснабжения зданий ускоряют коррозию трубопроводов // Новости электротехники. 2003. № 2 (22). URL: <http://news.elteh.ru/arh/2003/22/18.php>
16. Prestat M. Corrosion of structural components of proton exchange membrane water electrolyzer anodes : a review // Journal of Power Sources. 2023. Vol. 556. Issue 232469. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2022.232469.
17. Азаров В.Н., Гевлич С.О., Васильев Е.Г., Васильев К.А., Мирзонов М.В., Сидякин П.А. и др. К расчету остаточного ресурса труб тепловых сетей и сетей горячего водоснабжения // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 176.
18. Проскуркин Е.В., Геловани В.А., Сонк А.Н., Петров И.В., Ярема И.П., Сухомлин Д.А. Цинковые покрытия — основные современные системы защиты труб от коррозии // Сталь. 2018. № 6. С. 32–37.
19. Люзина Г.В., Стариков А.Н. Коррозия трубопровода горячей воды // Новый университет. Серия: Технические науки. 2015. № 5–6 (39–40). С. 57–59. DOI: 10.15350/2221-9552.2015.5-6

20. Чухин В.А., Андрианов А.П. Ускоренная коррозия оцинкованных трубопроводов в системах ГВС // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2019. № 7 (211). С. 22–30.

Поступила в редакцию 26 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 31 июля 2023 г.

Одобрена для публикации 31 июля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Николай Алексеевич Макиша** — кандидат технических наук, доцент, директор научно-образовательного центра «Водоснабжение и водоотведение»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 644678, Scopus: 55841479500, ResearcherID: I-1562-2015, ORCID: 0000-0003-2567-4450; makishana@mgsu.ru;

Валентин Александрович Чухин — кандидат технических наук, доцент, учебный мастер кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 17961, Scopus: 57194340218, ORCID: 0000-0003-4616-2489; sigma85@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Chuhin V.A., Andrianov A.P. Accelerated corrosion of galvanized piping in domestic hot water systems. *Plumbing, Heating and Air Conditioning*. 2018; 1:54-58. (rus.).
2. Liu S., Wu H., Zhao Q., Liang Z. Corrosion failure analysis of the heat exchanger in a hot water heating boiler. *Engineering Failure Analysis*. 2022; 142:106847. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106847
3. Song X., Zhang G., Zhou Y., Li, W. Behaviors and mechanisms of microbially-induced corrosion in metal-based water supply pipelines : a review. *Science of The Total Environment*. 2023; 895:165034. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165034
4. Li K., Sun L., Cao W., Chen S., Chen Z., Wang Y., Li W. Pitting corrosion of 304 stainless steel in secondary water supply system. *Corrosion Communications*, 2022; 7:43-50. DOI: 10.1016/j.corcom.2021.11.010
5. Kiuberis E.A., Vasiliev A.L. Increase in reliability of water supply systems as a factor of the sustainable development of cities. *The Privolzhsky Scientific Journal*. 2017; 4(44): 60-67. (rus.).
6. Andrianov A.P., Makisha N.A., Chuhin V.A. Corrosion of shut-off valves in hot water systems. *Plumbing, Heating and Air Conditioning*. 2018; 6:30-34. (rus.).
7. Otstavnov A.A., Harkin V.A. Rating of pressure pipes in internal water supply systems. *Plumbing, Heating and Air Conditioning*. 2013; 8(140):12-19. (rus.).
8. Baloitcha G.M.P., Mayabi A.O., Home P.G. Evaluation of water quality and potential scaling of corrosion in the water supply using water quality and stability indices: A case study of Juja water distribution network, Kenya. *Heliyon*. 2022; 8(3):e09141. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09141
9. Orlikowski J., Zielinski A., Darowicki K., Krakowiak S., Zakowski K., Slepiski P. et al. Research on causes of corrosion in the municipal water supply system. *Case Studies in Construction Materials*. 2016; 4:108-115. DOI: 10.1016/j.cscm.2016.03.001
10. Frog B.N., Pervov A.G. *Water treatment*. Moscow, ASV Publ., 2015; 512. (rus.).
11. Vasil'ev E., Azarov V., Gevlich D., Gevlich S., Vasil'ev K., Mirzonov M. Pipes and ulcers. *Energy control*. 2015; 8(72):24-25. (rus.).
12. Paulkin V.I. Zinc for corrosion protection. *Building materials, equipment, technologies of 21st century*. 2021; 2(265):35-40. (rus.).
13. Andrianov A.P., Chuhin V.A. Identification of corrosion of galvanized pipes in water supply systems. *Water supply and sanitary technique*. 2019; 9:39-44. (rus.).
14. Ryl J., Wysocka J., Darowicki K. Determination of causes of accelerated local corrosion of austenitic steels in water supply systems. *Construction and Building Materials*. 2014; 64:246-252. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.058
15. Grigor'ev O., Petuhov V., Sokolov V. Malfunctions of electric supply in buildings accelerates corrosion of pipelines. *News of electricity technics*. 2003; 2(22). (rus.).
16. Prestat M. Corrosion of structural components of proton exchange membrane water electrolyzer anodes : a review. *Journal of Power Sources*. 2023; 556(232469). DOI: 10.1016/j.jpowsour.2022.232469.
17. Azarov V.N., Gevlich S.O., Vasil'ev E.G., Vasil'ev K.A., Mirzonov M.V., Sidiakin P.A. et al. Resource calculation of heat and hot water pipes. *Issues of science and education*. 2014; 6:176. (rus.).
18. Proskurkin E.V., Gelovani V.A., Sonk A.N., Petrov I.V., Iarema I.P., Suhomlin D.A. Zinc coatings as a basic modern systems for corrosion protection. *Steel*. 2018; 6:32-37. (rus.).

19. Liuzina G.V., Starikov A.N. Corrosion of hot water pipe. *New university. Technical science series*. 2015; 5-6(39-40):57-59. DOI: 10.15350/2221-9552.2015.5-6 (rus.).

20. Chuhin V.A., Andrianov A.P. Accelerated corrosion of galvanized pipes in hot water systems. *Plumbing, Heating and Air Conditioning*. 2019; 7(211):22-30. (rus.).

Received June 26, 2023.

Adopted in revised form on July 31, 2023.

Approved for publication on July 31, 2023.

Bionotes: **Nikolay A. Makisha** — Candidate of Technical Science, Associate Professor, Director of research and education centre “Water supply and sewage”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 644678, Scopus: 55841479500, Researcher ID: I-1562-2015, ORCID: 0000-0003-2567-4450; makishana@mgsu.ru;

Valentin A. Chukhin — Candidate of Technical Science, Associate Professor, education master of the Department of Water supply and sewage; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 17961, Scopus: 57194340218, ORCID: 0000-0003-4616-2489; sigma85@yandex.ru.

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

The authors declare no conflict of interest.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.003.13

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1627-1646

Реализация государственной политики на основе проектов строительства объектов промышленности в особых экономических зонах

Наталья Григорьевна Верстина, Далер Зарифович Искандаров

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Сложившиеся экономические условия в РФ существенным образом изменили приоритеты государственной политики в области развития промышленности, что выражается в обеспечении эффективной политики пространственного планирования и создания объектов промышленности в регионах, где для этого имеются благоприятные условия. Одним из направлений реализации этих приоритетов политики является использование особых экономических зон (ОЭЗ), обладающих технологической инфраструктурой для выполнения проектов строительства промышленных объектов на их территориях. В этой связи актуальна разработка комплекса методов, способствующих реализации государственной политики в области промышленности, которые позволят обеспечить объективную оценку перспективы реализации проектов строительства объектов промышленности в ОЭЗ, учитывая их преимущества для участников инвестиционно-строительного процесса.

Материалы и методы. Исходными материалами исследования стали данные органов официальной статистики РФ, характеризующие инвестиционные процессы в промышленной сфере страны. Методологической основой послужили положения теорий инфографического моделирования, функциональных систем и статистические методы исследования — регрессионный и корреляционный анализы, которые направлены на установление значимости показателей, влияющих на эффективность управления и перспективы реализации проектов строительства объектов промышленности в ОЭЗ.

Результаты. Сформирована совокупность показателей, характеризующая перспективы реализации проектов строительства объектов промышленности в ОЭЗ на основе комплексного анализа среды проекта, которая его окружает. Установлены и формализованы аналитические зависимости показателей деятельности организаций инвестиционно-строительной сферы, осуществляющих строительство объектов промышленности, позволяющие определить тесноту связи этих показателей и в условиях вариативности их значений, составившие основу разработанного комплекса методов оценки.

Выводы. Разработанный подход к оценке перспективы реализации проектов строительства объектов промышленности в ОЭЗ дает возможность расширить информационную базу для принятия управленческих решений при выборе мест дислокации новых объектов промышленности на основе конкретизации условий осуществления проектной деятельности ее участниками, сложившихся в регионах страны. Совершенствование системы данных государственной статистики в предложенных направлениях может расширить репрезентативность и диапазон аналитики для принятия решений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: менеджмент, государственная политика, особые экономические зоны, проекты развития промышленности, организации инвестиционно-строительной сферы, инвестиции, аналитические зависимости

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Верстина Н.Г., Искандаров Д.З. Реализация государственной политики на основе проектов строительства объектов промышленности в особых экономических зонах // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 10. С. 1627–1646. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1627-1646

Автор, ответственный за переписку: Далер Зарифович Искандаров, iskandarovdaler@gmail.com.

Realization of state policy on the basis of projects for construction of industrial facilities in special economic zones

Natalia G. Verstina, Daler Z. Iskandarov

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

ABSTRACT

Introduction. The current economic conditions in the Russian Federation have significantly changed the priorities of state policy in the field of industrial development, which is expressed in the provision of an effective policy of spatial planning

and creation of industrial facilities in regions where there are favourable conditions for this. One of the directions of the implementation of these policy priorities is the use of special economic zones (SEZ) with technological infrastructure for the implementation projects for the construction of industrial facilities on their territories. In this regard, it is relevant to develop a set of methods that contribute implementation of state policy in the field of industry, which will provide an objective assessment of prospects for the implementation of industrial construction projects in the SEZ, considering their advantages for the participants of the investment and construction process.

Materials and methods. The initial materials of the study were the data of official statistics of the Russian Federation, characterizing investment processes in the industrial sector of the country. The methodological basis of the work was the provisions of theories of infographic modelling, functional systems, and statistical research methods — regression and correlation analysis, which are aimed at establishing the significance of indicators affecting the effectiveness of management and prospects for implementation of industrial construction projects in the SEZ.

Results. As a result of the research, a set of indicators characterizing the prospects for implementation of industrial construction projects in the SEZ based on a comprehensive analysis of the project environment that surrounds it was formed. Analytical dependencies of the performance indicators of investment and construction organizations carrying out the construction of industrial facilities were established and formalized, allowing to determine the closeness of connection of these indicators and under conditions of variability of their values, which formed the basis of the developed set of evaluation methods.

Conclusions. The developed approach to assessing the prospects for implementation of industrial construction projects in the SEZ allows expanding the information base for making managerial decisions when choosing locations for new industrial facilities, based on the specification of the conditions for implementation of project activities by its participants, established in the regions of the country. Improving of the state statistics data system in the proposed directions can expand the representativeness and range of analytics for decision-making.

KEYWORDS: management, public policy, special economic zones, industrial development projects, investment and construction organizations, investments, analytical dependencies

FOR CITATION: Verstina N.G., Iskandarov D.Z. Realization of state policy on the basis of projects for construction of industrial facilities in special economic zones. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(10):1627-1646. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1627-1646 (rus.).

Corresponding author: Daler Z. Iskandarov, iskandarovdaler@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Проводимая государством политика по развитию промышленности страны посредством реализации проектов строительства новых промышленных объектов обусловлена необходимостью решения проблемы наличия диспропорций экономического развития регионов РФ между собой, препятствующих превращению промышленности в конкурентоспособную и инновационную сферу экономики страны. Пространственная неравномерность локализации особых экономических зон (ОЭЗ) по стране ведет к усилению неравенства в социально-экономическом развитии регионов: возникает ситуация, при которой образуются регионы-лидеры, имеющие высокую экономическую активность и инвестиционную привлекательность, «пресыщенные» ОЭЗ [1], но при этом остаются без должного внимания другие субъекты РФ. Проведенное авторами исследование посвящено поиску решений в сложившейся ситуации недостаточно эффективного применения ОЭЗ в политике пространственного развития. Во многом подобное положение вызвано отсутствием скоординированных планов по выполнению значимых инвестиционных проектов «приоритетного назначения» в отраслях промышленности, которые бы формировались с учетом интересов сторон, реализующих их на местах. Многие эксперты убеждены, что тенденция к увеличению конкуренции между регионами в борьбе за инвесторов и их вложения высока и будет только нарастать [1], однако, мнения касательно этого вопроса различны: одни убеждены, что подобная ситуация характерна в условиях политики пространственного развития, где преобладает неравномерность в фор-

мировании центров экономического роста; другие исследователи приходят к мнению, что необходимо продолжать применять ОЭЗ, оптимизируя механизмы регулирования их учреждения и методы оценки эффективности их функционирования [2]. Таким образом, становится актуальным рассмотрение проектов промышленного развития в новых аспектах, которые обеспечат необходимый уровень принятия инвестиционных решений с учетом возможностей проектной деятельности сторонами, заинтересованными в ее осуществлении в ОЭЗ. Также актуально создание методов, которые позволят осуществить оценку перспективы реализации проектов развития промышленности в ОЭЗ с позиций не только их коммерческой эффективности, но и в соответствии с положениями политики пространственного развития страны, в которой значительное внимание уделяется снижению дифференциации между регионами.

В этой связи в центр внимания в исследовании попали ОЭЗ, которые способны улучшить инвестиционный климат в регионе и предоставить готовую «инженерно-техническую и административную площадку» под проект строительства. В современных условиях ОЭЗ — это форма взаимодействия государства и частных предпринимателей, направленная на реализацию приоритетных проектов развития отраслей экономики нашей страны, имеющих федеральное или региональное значение [3, с. 2]. При этом большое количество исследователей, изучавших роль ОЭЗ в развитии промышленности страны, пришли к выводу, что они являются эффективным направлением для реализации государственной политики [4] и предполагают формирование геогра-

фической концентрации субъектов экономической деятельности на единой территории, которые объединены одной отраслевой направленностью [5, с. 148]. Положительными для проектов развития промышленности служат преимущества ОЭЗ, которые заключаются в наличии ряда преференций и льгот для их резидентов, способствующих привлечению инвестиций и осуществлению проектной деятельности в благоприятных условиях [1, с. 80; 6, 7]. Следует отметить и перспективы использования различных форм участия в разработке и реализации проекта управляющих компаний ОЭЗ, которые создают дополнительные возможности выбора для круга заинтересованных в проекте лиц — начиная от государства, заканчивая будущими владельцами промышленной недвижимости [8, с. 162; 9, 10].

Вместе с тем имеются исследования, которые отражают неоднозначность применения данного направления в пространственном развитии, что обусловлено, на наш взгляд, отсутствием методов оценки взаимовлияния различных экономических систем — самой ОЭЗ и организаций, ведущих деятельность на ее территории [11, с. 71; 12, 13]. При этом все исследователи отмечают значимость формирования среды реализации проектов развития, которая может позиционироваться как «ключевой фактор» перспективности использования возможностей инструмента ОЭЗ [5, с. 149] в реализации госполитики страны в промышленности.

Цель исследования — разработка методов оценки степени зависимости таких субъектов экономической деятельности, как организации инвестиционно-строительной сферы (ИСС) (выступающие в роли инвесторов, застройщиков и т.д.) в проектах развития промышленности и организации-резиденты ОЭЗ, связанные с промышленным строительством. Под степенью зависимости понимается сопряженность между признаками исследуемого явления, выраженная аналитически коэффициентом корреляции, который характеризует связи между изменениями величин показателей. В зависимости от характера и предела колебаний коэффициента корреляции можно получить представление о направлении связи признаков, которая может быть прямой или обратной, а также выяснить, как соотносятся зависимая и независимая переменные изучаемых признаков — функционально или статистически.

При этом на основе единого методического подхода были установлены и решены в исследовании следующие задачи:

1. Определение и формализация показателей, характеризующих перспективы реализации проекта развития промышленности в ОЭЗ в виде строительства промышленных объектов и формирование их групп на основе разработанных классификаций.

2. Теоретическое обоснование и определение характера аналитической зависимости показателей деятельности организаций ИСС и ОЭЗ при реализа-

ции проекта развития промышленности и условий их интерпретации.

3. Апробация разработанного комплекса методов на примере деятельности выбранных ОЭЗ, осуществляющих проекты развития промышленности, позволившие на экспериментальном уровне выявить возможности их использования для реализации государственной политики в области промышленности.

Исследование построено на применении общенаучных методов анализа и синтеза, на основе которых были описаны позиции авторов относительно перспектив осуществления проектной деятельности в ОЭЗ, ориентируясь на приоритеты государственной политики по развитию промышленности страны. При решении представленных выше задач — определении совокупности показателей оценивания с учетом специфики исследуемых объектов и их классификации выбран метод инфографического моделирования, который позволяет в условиях проведения оценки проводить комплексный анализ среды реализации проекта в конкретных условиях определенной ОЭЗ. Для изучения перспектив и мотивации заинтересованных сторон к реализации проекта развития промышленности на основе строительства промышленных объектов в ОЭЗ выполнено формирование пар корреляционных переменных, что изложено в описании соответствующих функций — максимизации прибыли и производственной функции Кобба – Дугласа, характеризующей специфику зависимости затрат и времени. Выявление зависимости пар переменных, формируемых из показателей взаимодействия сторон проекта, определялось путем применения метода корреляционного и регрессионного анализов с последующим распределением итогов расчета согласно шкале Чеддока, позволяющей интерпретировать результаты в качественные характеристики управления [14, с. 74; 15, с. 47]. Апробация разработанного метода количественной оценки зависимости организаций ИСС и ОЭЗ осуществлялась на практических данных, полученных в результате анализа показателей ряда ОЭЗ страны, что дало возможность комплексно рассмотреть процессы реализации проекта развития промышленности в исследуемых условиях. Разработанные методы предполагают возможность совершенствования процесса реализации не только самих проектов, но и процедуры выбора места под учреждение ОЭЗ. Отправной позицией в исследовании стала комплексная характеристика современного состояния ОЭЗ РФ, которая выполнена как с позиций определения их правового статуса и возможностей реализации проектной деятельности на этой основе, так и с позиций формирования данных из официальных источников, свидетельствующих об их текущем состоянии, в том числе и результативности деятельности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

По результатам проведенного обзора условий функционирования современных ОЭЗ в РФ, существенных для оценки проектной деятельности на их территориях, было получено достаточное количество материалов, свидетельствующих о наличии на них значительного количества земельных участков, которые остаются «бесхозными» и не используются для реализации проектов; аналогичным образом складывается и ситуация с недостаточно задействованной инженерно-технической инфраструктурой, что приводит к снижению эффективности создания ОЭЗ [16, с. 3]. На рис. 1, 2 представлены диаграммы, иллюстрирующие соотношение загруженной и свободной инфраструктуры ОЭЗ технико-внедренческого типа (ТВТ), промышленно-производственного типа (ППТ) и портового типа (ПОЭЗ) в 2021 г.

Как свидетельствуют данные, приведенные на рис. 1, 2, порядка 60 % пригодных для строительства земельных участков ОЭЗ свободны для использования (380 га — ОЭЗ ТВТ, 4413 га — ОЭЗ

ППТ и ПОЭЗ)¹. «Изобилие» земельных площадей ОЭЗ свидетельствует о наличии проблем в ее освоении, несмотря на увеличивающееся количество резидентов из года в год¹. Нагрузка на инженерно-техническую инфраструктуру различна, но в среднем от 35 до 65 % мощностей не задействованы (за исключением мощностей теплоснабжения ОЭЗ ППТ), что приводит к росту издержек на ее содержание и снижению рентабельности ОЭЗ. Существует множество причин, объясняющих сложившееся положение с использованием в недостаточном объеме инфраструктуры. Обобщая многочисленные экспертные оценки, перечислим некоторые из них: отставание по срокам создания объектов инфраструктуры, что отрицательно повлияло на инвестиционную привлекательность ОЭЗ; диспропорция в распределении инвестиций — 67 % всех вложений приходится на четыре ОЭЗ, которые на протяжении нескольких лет продолжают занимать лидирующие позиции в ежегодном рейтинге эффективного функционирования ОЭЗ¹; несоблюдение обязательств со стороны субъектов РФ в части создания объектов

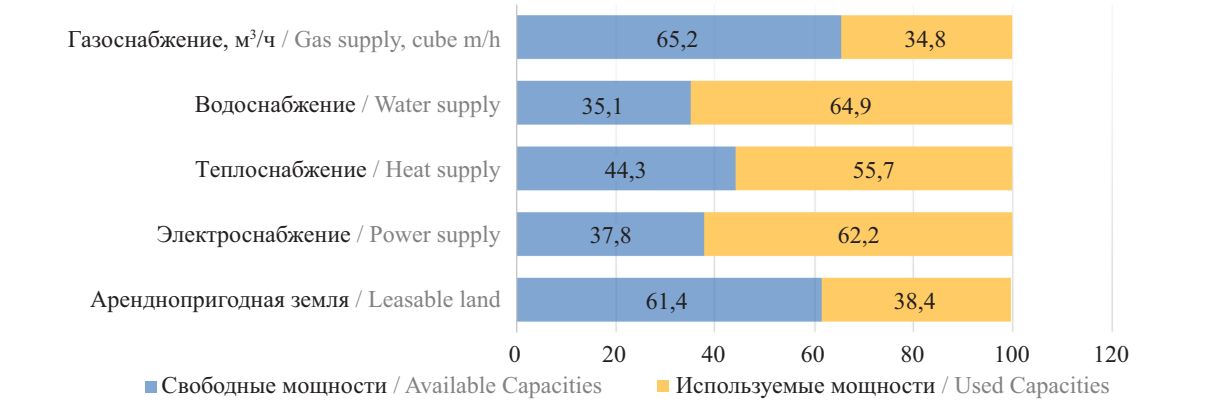


Рис. 1. Показатели заполненности инфраструктуры ОЭЗ технико-внедренческого типа ТВТ, 2021 г.¹

Fig. 1. Infrastructure occupancy rates of SEZ of technology innovation type, 2021¹ year

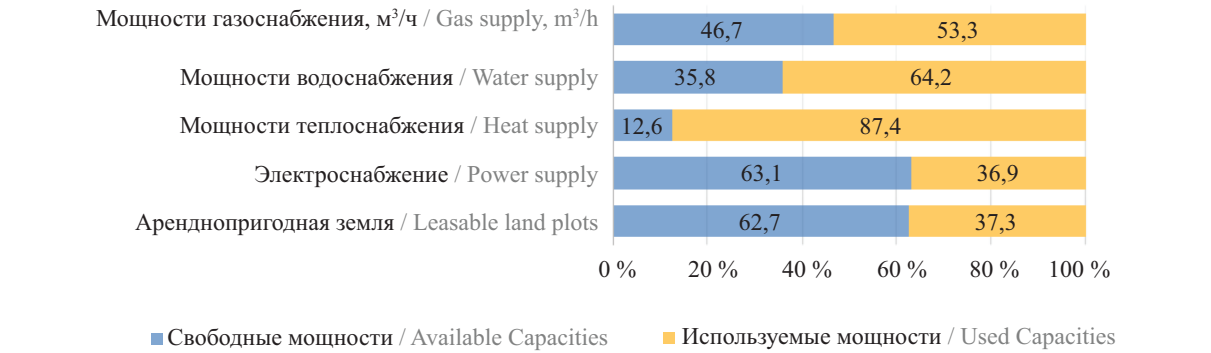


Рис. 2. Показатели заполненности инфраструктуры ОЭЗ промышленно-производственного и портового типа, 2021 г.¹

Fig. 2. Infrastructure occupancy rates of SEZ of industrial-production and port type, 2021¹ year

¹ Гуляева Д.А., Гусев И.Е., Баскакова Е.А., Бухарова М.М., Князева Е.А., Кравченко Е.И. и др. Бизнес-навигатор по особым экономическим зонам России — 2022. Вып. 6. М. : АКИТ РФ, 2022. 253 с.

строительства, обеспечивающих функционирование ОЭЗ; непроработанный регламент в организации строительства и инвестирования в строительные проекты в ОЭЗ; отсутствие единой стратегии по развитию инфраструктуры ОЭЗ [17, с. 214].

Кроме того, остается неясным правовой статус ряда объектов ОЭЗ, что подразумевает необходимость пересмотра нормативного регулирования ОЭЗ в части законодательства. По мнению представителей Счетной палаты РФ, необходимо дать определения понятиям «инфраструктура ОЭЗ», «объекты, предназначенные для обеспечения функционирования ОЭЗ, «прилегающая территория ОЭЗ», иначе это приведет к строительству объектов, не имеющих отношения к инфраструктуре ОЭЗ, которые будут профинансированы из бюджетных средств². Структура инвестиций в создание инфраструктуры ОЭЗ, осуществляемых различными инвесторами, представлена в табл. 1.

Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что средства федерального и регионального бюджетов равны 88 % всей совокупности величины инвестиций в создание инфраструктуры ОЭЗ, но в силу указанных выше причин наблюдается низкая отдача от этих вложений, которой сопутствует и незначительное количество создаваемых рабочих мест, несмотря на рост числа организаций резидентов [18, с. 51]. Многие ученые, изучавшие вопросы эффективности инвестиций в ОЭЗ, отмечали в связи с этим нерациональное расходование государственных средств, связанных с использованием инфраструктуры ОЭЗ [16, 17].

Одним из важных направлений, обеспечивающих эффективность реализации госполитики, связанной с использованием ОЭЗ, является создание эффективной системы взаимодействия между уровнями государственного регулирования ОЭЗ (департамент Министерства экономического развития — корпорация субъекта РФ — органы местной власти). Ее отсутствие в настоящее время приводит к бюрократизации архитектуры управления, «размытию» ответственности за использование целевых средств и отставанию

в сроках по строительству объектов ОЭЗ [19, с. 124; 20, с. 23]. Предполагается, что излишняя бюрократизация процесса в получении исполнительно-разрешительной документации и согласований на осуществление проектной деятельности в ОЭЗ будет нивелирована наличием принципа «одно окно», который направлен на минимизацию затрат инвесторов проекта на этапе предпроектной подготовки [20, с. 10; 21, с. 308]. В большинстве случаев причины недостаточной удовлетворенности инвесторов в работе с ОЭЗ и трудностей их полноценного внедрения в экономику страны носят организационный характер, связанный с их управлением и финансированием, поэтому необходимо обеспечить формирование условий для изменения распределения средств инвестирования, ориентируясь в большей степени на учет интересов взаимодействующих сторон «на местах» [2, с. 150]. По мнению авторов исследования, необходимость актуализации подходов к оценке перспектив инвестирования при создании проектов развития промышленности на территории ОЭЗ с последующим вовлечением в хозяйственный оборот земель ОЭЗ и повышением заполненности мощностей инженерно-технической инфраструктуры в настоящее время очевидна [8, 22]. Важно подчеркнуть, что помимо решения инфраструктурных вопросов — подобных проектов, управляющие компании ОЭЗ предоставляют широкий перечень консалтинговых услуг от концептуальной фазы до непосредственно работ по возведению объектов [18, с. 54].

Разработка комплекса методов, способствующих реализации государственной политики в области промышленности, которые позволят обеспечить объективную оценку перспективы реализации проектов строительства объектов промышленности в ОЭЗ в охарактеризованных выше условиях, основана на авторском подходе к формированию показателей, состоящем из двух частей, которые отражают последовательное выполнение поставленных в исследовании задач. Первая часть исследования посвящена формированию перечня показателей и их групп, характеризующих эффективность реализации проекта развития промышленности в ОЭЗ по направлениям комплексного анализа среды осуществления проектной деятельности. Вторая часть — это теоретико-методологическое обоснова-

² Бюллетень Счетной палаты РФ. Преференциальные режимы. 2022. № 2. URL: Bul-2-2022.pdf (sptulobl.ru)

Табл. 1. Источники инвестиций в создание инфраструктуры ОЭЗ, 2021 г.¹
Table 1. Sources of investment in the creation of SEZ infrastructure, 2021¹ year

Источник инвестиций Source of investment	Сумма инвестиций, млн руб. The number of investments, million rubles	Процентное соотношение, % Percentage ratio, %
Средства федерального бюджета Federal budget funds	126 669	55
Средства регионального бюджета Regional budget funds	78 143	33
Инвестиции управляющей компании Investments of the management company	36 885	12

ние, направленное на установление мотивов участников реализации проектов развития промышленности на территории ОЭЗ на основе аналитических зависимостей. Кроме того, на данном этапе алгоритмизирован процесс оценки значимости этих зависимостей применительно к цели исследования.

Под средой проекта строительства объектов промышленности в ОЭЗ в контексте настоящего исследования понимается совокупность факторов, которые оказывают эффект на инвестиционную деятельность. Принято делить среду проекта на внешнюю и внутреннюю. Внешняя среда проекта — это условия и факторы, которые не поддаются контролю и не зависят от участников проектной деятельности. К ним можно отнести следующие виды факторов: политические, экономические, социальные, общественно-правовые и т.д. Факторы внешней среды могут оказывать как прямое, так и косвенное воздействие, однако в независимости от направления воздействия их значимость не следует недооценивать. К внутренней среде относятся факторы, отражающие потенциал и состояние организации — участника проектной деятельности с позиций реализации проекта. В эту группу могут быть включены, к примеру: характеристики производственной базы организации, имеющиеся у нее в наличии ресурсы различного вида (машины, оборудование и др.); финансовое состояние, которое может быть отражено в степени платежеспособности, устойчивости и способности организации нести ответственность по собственным материальным обязательствам [23, с. 50].

Применительно к цели исследования определен источник формирования совокупности показателей — это анализ внутренней и внешней среды, в которых осуществляют свою деятельность участники проекта развития промышленности в ОЭЗ. Применяемый комплексный подход и всесторонний анализ среды позволит синтезировать объективные показатели, которые в наибольшей степени отражают количественные и качественные характеристики изучаемого объекта исследования — проекта строительства промышленного объекта. На основании теоретических положений и принципов инфографического моделирования была воссоздана и отображена внешняя и внутренняя среда взаимодействия субъектов — организаций ИСС, ОЭЗ и самого проекта в аспекте обеспечения выполнения приоритетов государственной политики.

Важным элементом анализа внешней среды в соответствии с классическими положениями экономической теории является определение *экстерналий* — внешних эффектов, имеющих как положительное, так и негативное влияние [24, с. 2; 25, 26], проявляющееся в форме выгод или издержек не только для участников проекта, но и для третьих лиц, не участвующих в процессе реализации проекта развития промышленности в ОЭЗ. Аналогичным

образом проявляются внутренние эффекты взаимодействия — *интерналии*, несущие как выгоды, так и издержки [27, 28]; однако особенность интерналий состоит в более сложном прогнозировании их воздействий, вызванных транзакционными издержками, которые ограничивают полноту получаемой информации для исследуемых субъектов экономической деятельности. Результаты комплексного анализа экстерналий и интерналий можно представить в виде совокупности относительных и абсолютных показателей, формализуемых и приведенных к относительным значениям с единой размерностью (доли, проценты) и описываемых на основе линейных уравнений, которые выражают зависимость переменной от независимых переменных (регрессионный анализ), отражающих корреляцию регрессантов от регрессоров.

На первоначальном этапе исследования были определены направления комплексного анализа и осуществлена их характеристика. Разработанная в этой связи последовательность формирования совокупности показателей показана на схеме (рис. 3), которая демонстрирует их распределение на группы показателей, связанных с внутренней и внешней средой. Представленный на рис. 3 элемент анализа представляет собой двухконтурную функциональную систему, наполненную информационными потоками среды, в которых содержатся данные, раскрывающие специфические особенности и условия ведения инвестиционно-строительной деятельности (ИСД) в ОЭЗ. Итогом этой аналитической деятельности по раскрытию назначения каждого из потоков функциональной системы, в которых содержатся данные, является синтезированная совокупность показателей комплексного анализа внешней и внутренней среды проекта развития промышленности.

Комплексный анализ внешней среды заключается в выявлении условий, которые оказывают воздействие на реализацию проекта и участие субъектов экономической деятельности в этих процессах. Данное направление анализа предполагает определение факторов, которые формируют успех взаимодействия участников проектной деятельности и самого проекта, рассматриваемых по отдельности, в качестве двух самостоятельных аналитических срезов. К этим показателям были отнесены те, которые раскрывают классические показатели коммерческой эффективности реализации проекта, связанные с определением его доходности, рентабельности и т.д.

В рамках исследования авторы также выделяют дополнительные показатели, выражающие специфику проектной деятельности в ОЭЗ, прежде всего учитывающих продолжительность различных этапов по реализации проекта развития промышленности на основе строительства промышленных объектов. Для выявления перспектив повышения эффективности взаимодействия организаций и ОЭЗ были разработаны показатели, которые в дальней-



Рис. 3. Порядок разработки совокупности показателей реализации проекта развития промышленности в ОЭЗ

Fig. 3. The procedure for developing a set of indicators for implementation the industrial development project in the SEZ

шем послужили основой для формирования пар корреляционных переменных, выраженные абсолютными и относительными величинами, использование которых позволяет оценить степени зависимости организаций ИСС (выступающие в роли инвесторов, застройщиков и т.д.) в проектах развития промышленности и организаций-резидентов ОЭЗ ИСС.

Комплексный анализ внутренней среды взаимодействий направлен на изучение финансово-хозяйственной деятельности (АФХД) организации, осуществляющей строительство промышленных объектов в ОЭЗ. Данные показатели позволяют спрогнозировать перспективы участия этой организации в проектной деятельности, определив интегральные показатели его ликвидности и устойчивости. Необходимо отметить, что авторами для этого принят «классический набор» показателей АФХД.

Необходимым этапом в разработке совокупности показателей является определение требований к их свойствам, для которых были использованы положения классической экономической теории в части их теоретического построения, а именно свойства:

- *сбалансированность*, означающая сочетание финансовых и нефинансовых характеристик деятельности организации и разрабатываемых показателей;
- *сопоставимость*, предполагающая необходимость наличия сравнительной базы для получения объективных показателей деятельности организа-

ций ИСС и ОЭЗ в условиях реализации проектов развития промышленности;

- *ретроспектива*, заключающаяся в учете времени как ключевого аспекта динамических изменений параметров проекта и окружающей его среды (внутренней и внешней), что в значительной степени влияет на порядок разработки совокупности показателей;
- *агрегация*, которая представляет собой обобщение частных измерителей в единый показатель, содержащий сводную информацию;
- *многоэтапность* формируемой совокупности показателей, связанная с возможностью их применения на различных этапах проекта развития промышленности.

Благодаря сформированной совокупности показателей осуществлено обоснование в необходимости поиска и построения пар переменных, которые на основе принятого в исследовании подхода позволяют сформировать методы реализации государственной политики в области промышленности на основе проектов ее развития. В этой связи в рамках исследования выбраны пары переменных, которые дадут возможность прогнозирования процессов выполнения проектов развития и определения перспектив взаимодействия участников проекта.

На следующем этапе исследования было сформировано теоретико-методологическое обоснование, которое позволило идентифицировать мотивы участников реализации проектов развития промышленности на территории ОЭЗ на основе аналитиче-

ских зависимостей. Для этого данные зависимости, описывающие взаимодействия участников проекта, формализованы следующим образом:

$$\max PR = TR - TC, \quad (1)$$

где $\max PR$ — прибыль, которая стремится к максимизации в деятельности предприятий; TR — общий доход, определяемый линейной функцией P — цены продукции и q — объема продукции; TC — общие издержки, определяемые производственной функцией, учитывающей факторы производства и их цену.

Допуская, что ключевая цель организации, осуществляющей строительство объектов промышленности, во взаимодействии с ОЭЗ — это увеличение прибыли, связанное со стремлением к ее увеличению [29], в условиях снижения издержек ИСД, функция примет вид:

$$\max PR = \max \{pq - p_K K - p_L P\}, \quad (2)$$

где $q = f(K, L)$ — производственная функция, определяемая как величина затрат на приобретение факторов производства для реализации проекта; K, L — факторы производства, которых может быть и больше.

Воссозданная аналитическая зависимость определяется специфической особенностью среды ведения проектной деятельности, характеризующейся значительным влиянием факторов затрат и времени, вложенных в проект. В этой связи авторы считают необходимым введение производственной функции следующего вида [30]:

$$f(x_1 w(t) x_2 w(t) x_3 w(t) \dots x_n), \quad (3)$$

где $f(x)$ — производственная функция, отражающая линейную зависимость цены фактора и времени; x — фактор, воспринимаемый как переменная для оценки перспектив взаимодействия; w — цена фактора; t — время или период.

Таким образом, установив наличие основных функций, определяющих заинтересованность организаций, осуществляющих строительство объектов промышленности на территории ОЭЗ, следует внести ясность в трактование результатов корреляционного анализа. Коэффициент, полученный в ходе расчета, необходимо интерпретировать, используя для этого шкалу Чеддока, которая имеет несколько градаций силы функциональной связи:

- весьма высокая связь (0,9–0,99) зависимости пар переменных перспектив взаимодействия;
- высокая связь зависимости (0,7–0,9) пар переменных перспектив взаимодействия;
- заметная связь зависимости (0,5–0,7) пар переменных перспектив взаимодействия;
- умеренная связь зависимости (0,3–0,5) пар переменных перспектив взаимодействия.

Для оценки корреляции пар переменных следует рассчитать коэффициент корреляции Пирсона [31]:

$$r = \frac{n \cdot \sum (x_i \cdot y_i) - (\sum x_i \cdot \sum y_i)}{\sqrt{[n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2]} \cdot \sqrt{[n \cdot \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}}, \quad (4)$$

где n — число ОЭЗ, участвующих в оценке корреляции; x_i — количество организаций ИСС полного цикла, осуществляющих деятельность в одном субъекте РФ с организациями ИСС, расположенными в ОЭЗ (значения, принимаемые переменной x); y_i — количество организаций ИСС в ОЭЗ, находящихся в одном субъекте РФ (значения переменной y).

Следующим этапом после расчета коэффициента корреляции требуется выполнить проверку статистической достоверности полученного значения путем выявления критических значений корреляции Пирсона:

$$k = n - 2, \quad (5)$$

где k — количество степеней свободы.

Важным условием обоснованности полученного значения коэффициента служит установление его значимости, применив для этого t -критерий Стьюдента, который предполагает выдвижение гипотезы H_0 , которая опровергает или подтверждает существование корреляционной связи между переменными. Для верификации проводится сравнение расчетного критерия Стьюдента t_p с табличным значением критерия t_p , принимаемыми по заданным уровням значимости α , как правило, равным 0,05 или 0,01. Таким образом, расчет критерия Стьюдента имеет следующий вид:

$$t_p = \frac{r_{xy} \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}}, \quad (6)$$

где r_{xy} — коэффициент корреляции Пирсона, рассчитанный на основе зависимости переменных количества организаций ИСС полного цикла и организаций ИСС, расположенных в ОЭЗ в одном субъекте РФ; $n - 2$ — количество степеней свободы k из числа выборок обоих наблюдаемых значений.

В случае, если расчетное значение критерия Стьюдента больше табличного, то подтверждается значимость коэффициента корреляции между исследуемыми переменными. В дальнейшем требуется перейти к разработке уравнения парной регрессии — регрессионному анализу. Ключевая задача регрессионного анализа — в возможности осуществления прогноза изменения зависимой переменной y на основании изменения значения независимой переменной x . Ввиду того, что ранее предложенный порядок корреляционного анализа связан с формированием линейной зависимости, то уравне-

ние регрессии аналогичным образом имеет линейную функциональную зависимость:

$$y = a + bx, \quad (7)$$

где y — количество организаций ИСС полного цикла, осуществляющих деятельность в едином с организациями ИСС субъекте РФ; a, b — коэффициенты регрессии, определяющие, насколько изменится количество организаций полного цикла ИСС, если изменится число организаций обычного типа в ОЭЗ в одном субъекте РФ на единицу, учитывая характер изменения корреляции; x — число организаций ИСС в ОЭЗ, находящихся в одном субъекте РФ с организациями полного цикла.

Для определения коэффициентов линейной регрессии (парной) следует применить метод наименьших квадратов, чтобы минимизировать суммы квадратов отклонений функций от исходных переменных:

$$\begin{cases} a \cdot n + b \cdot \sum x = \sum y \\ a \cdot \sum x + b \cdot \sum x^2 = \sum xy \end{cases}, \quad (8)$$

где n — число выборок из числа обоих наблюдаемых явлений; x^2 — квадрат независимой переменной, числа организаций ИСС в ОЭЗ.

Решение полученной системы заключается в расчете значения коэффициентов регрессии, которые формируют искомое уравнение $\hat{y}$, что дает возможность прогнозирования на основе изменения числа организаций ИСС в ОЭЗ величины возможных объединений обособленных организаций в форму организации-интегратора. Итогом регрессионного анализа является установление коэффициента детерминации, который характеризует долю дисперсии y . В случае линейной регрессии коэффициент детерминации рассчитывается так:

$$R^2 = r_{xy}^2. \quad (9)$$

Коэффициент детерминации принимает значение от 0 до 1, которое аналогичным образом интерпретируется в соответствии со шкалой Чеддока. Чем ближе полученное значение к 1, тем выше соответствие модели данным. В рамках исследования уравнение регрессионного анализа наглядно свидетельствует о силе и наличии связи между группами факторов, характеризующих внешнюю и внутреннюю среду.

Следует отметить, что применение регрессионного анализа связано с множеством итераций, предполагающих определение переменных, которые в наибольшей степени отражают исследуемое явление. В процессе построения уравнений линейной регрессии необходимо применять метод наименьших квадратов, позволяющий выявить те оценки параметров уравнения, при которых сумма квадратов отклонений фактических значений y от теоретических минимальна, т.е. выявить коэффициенты линейной зависимости, при которых значения функций двух переменных будут наименьшими.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам теоретического обоснования совокупности показателей, которые позволят обеспечить объективную оценку перспективы реализации проектов строительства объектов промышленности в ОЭЗ в охарактеризованных выше условиях, были разработаны сводные табл. 2, 3. Предлагаемая авторами совокупность показателей распределена в соответствии с сопоставимостью величин и единиц измерения на абсолютную и относительную.

Структурирование системы показателей в ситуации реализации конкретного проекта стоит осуществлять по выбираемым направлениям комплексного анализа внутренней и внешней его среды.

К абсолютным показателям относятся те, которые выражают доходность и итоговые результаты проекта, связанные с ней. К относительным показателям отнесены те, которые, как правило, безразмерны и отражают ликвидность, платежеспособность, финансовую устойчивость или определенный коэффициент, получаемый путем соотношения двух абсолютных величин.

Источником сведений, которые следует применять для проведения оценки эффективности взаимодействия организаций, осуществляющих строительство объектов промышленности, и ОЭЗ при реализации проектов могут послужить документы системы государственной отчетности, данные государственных ведомств и органов власти, курирующих деятельность ОЭЗ в нашей стране. Направление анализа внутренней среды предполагает проведение полного АФХД организации, при этом для представления результатов исследования были выбраны наиболее существенные показатели (табл. 2).

Представленная совокупность показателей распределена в соответствии с анализируемой средой проекта — на показатели внешней и внутренней среды.

К показателям внутренней среды отнесены в приоритетном порядке те, которые характеризуют его финансовый потенциал — платежеспособность, деловую активность, рентабельность, с последующим определением типа его финансовой устойчивости и ликвидности баланса. Значимость этих показателей заключается в оценке внутреннего состояния организации, осуществляющей строительство объектов промышленности, для участия в реализации проекта путем сопоставления его имеющихся ресурсов с необходимым количеством средств на осуществление проектной деятельности в ОЭЗ.

К показателям внешней среды относятся показатели, которые выражают «неподконтрольные» условия для организаций, осуществляющих строительство объектов промышленности, условия. Од-

Табл. 2. Показатели эффективности реализации проекта развития промышленности в ОЭЗ
Table 2. Indicators of effectiveness for implementation the industrial development project in the SEZ

Направление мониторинга и показатель Monitoring direction and indicator	Обозначение Designation	Сопоставимость Comparability
Внутренняя среда Internal environment		
Показатели дохода предприятия Indicators of the company's income		
Выручка Revenue	$R_{исс}$	Абсолютная Absolute
Себестоимость продаж (продукция и услуги) Cost of sales (products and services)	СР	Абсолютная Absolute
Величина чистой прибыли The amount of net profit	ЧП	Абсолютная Absolute
Показатели финансовой устойчивости Indicators of financial stability		
Коэффициент автономии The coefficient of autonomy	K_a	Относительная Relative
Коэффициент капитализации Capitalization ratio	$K_{кап}$	Относительная Relative
Показатели деловой активности Business activity indicators		
Фондоотдача Return on funds	Φ_o	Относительная Relative
Оборачиваемость собственного капитала Equity turnover	$O_{ск}$	Относительная Relative
Показатели рентабельности Profitability indicators		
Коэффициент рентабельности продаж Return on sales ratio	K_R	Относительная Relative
Рентабельность собственного капитала Return on equity	ROE	Относительная Relative
Показатели ликвидности Liquidity indicators		
Коэффициент текущей ликвидности Current liquidity ratio	$K_{тл}$	Относительная Relative
...	...	...

нако в ОЭЗ в силу статуса их условий реализации проектов в большей степени предсказуемы [8, 22]. В этой связи авторы исследования разработали показатели, которые распределены на две группы:

- показатели эффективности реализации проекта, учитывающие значимость льгот и преференций ОЭЗ на различных этапах осуществления проекта, от предпроектного этапа до запуска проекта в эксплуатацию;
- показатели эффективности взаимодействия организаций ИСС и ОЭЗ, на основе которых следует сформировать аналитические зависимости для изучения и прогнозирования различных сценариев и тенденций по размещению проектов развития промышленности на территории конкретной ОЭЗ. Показатели внешней среды представлены в табл. 3.

Апробация полученных результатов выполнялась поэтапно, каждый этап при этом — это метод,

способствующий реализации государственной политики в области промышленности, который в совокупности с другими методами позволяет обеспечить объективную оценку перспективы реализации проектов строительства объектов промышленности в ОЭЗ в охарактеризованных выше условиях (рис. 4).

Отметим важную особенность использованного подхода к формированию показателей — их набор является инвариантным в зависимости от ситуации анализа и принятия управленческого решения, к примеру органами государственной власти, относительно перспектив реализации проекта развития промышленности на основе строительства промышленных объектов в определенной ОЭЗ, дислоцирующейся в том или ином федеральном округе страны. Его отличительная особенность также заключается в возможности осуществления «тонких настроек» в анализе в зависимости от экстерналий или интерналий планируемого

Табл. 3. Показатели эффективности реализации проекта развития промышленности в ОЭЗ
Table 3. Indicators of effectiveness for implementation the industrial development project in the SEZ

Внешняя среда External environment		
Показатели эффективности реализации проекта Project performance indicators		
Чистый дисконтированный доход Net discounted income	NPV	Абсолютная Absolute
Продолжительность выполнения подготовительных работ при реализации проекта в ОЭЗ Duration of preparatory work during the implementation of the project in the SEZ	$T_{в.п.}$	Абсолютная Absolute
Продолжительность получения документации и разрешений от уполномоченных государственных учреждений Duration of obtaining documentation and permits from authorized state institutions	$T_{в.р.г}$	Абсолютная Absolute
Разница во времени между продолжительностью выполнения проектных и предпроектных работ The difference in time between the duration of project and pre-project work	$\Delta t_{в}$	Абсолютная Absolute
Продолжительность выполнения СМР при реализации проекта в ОЭЗ Duration of the implementation of construction works during the implementation project in the SEZ	$T_{смр}$	Абсолютная Absolute
Индекс рентабельности инвестиций Return on investment index	PI	Относительная Relative
Внутренняя норма рентабельности Internal rate of return	IRR	Относительная Relative
Коэффициент соотношения времени по выполнению предпроектных работ с временем на выполнение СМР The ratio of the time for the implementation of pre-project work with the time for the implementation of construction works	K_c	Относительная Relative
Показатели эффективности взаимодействия организаций ИСС и ОЭЗ Indicators of the effectiveness of the interaction of the ICS and SEZ organizations		
Количество организаций ИСС, осуществляющих деятельность в ОЭЗ Number of ICS organizations operating in the SEZ	$N_{пр}$	Абсолютная Absolute
Число проектов, реализованных на территории ОЭЗ Number of projects implemented in the SEZ territory	$N_{исп}$	Абсолютная Absolute
Объем инвестиционных вложений, осуществленный резидентами ОЭЗ строительной направленности The volume of investments made by residents of the construction oriented SEZ	I	Абсолютная Absolute
Значение кластеров, осуществляющих деятельность в одном с ОЭЗ субъекте РФ The importance of clusters operating in the same SEZ subject of the Russian Federation	$N_{кл}$	Абсолютная Absolute
Среднегодовое значение организаций ИСС, привлеченных в ОЭЗ с момента её создания The average annual value of ICS organizations involved in the SEZ since its creation	$\bar{n}$	Относительная Relative
Обеспеченность свободной технической инфраструктурой для реализации технически сложных и уникальных проектов Provision of free technical infrastructure for the implementation of technically complex and unique projects	$O_{инф}$	Относительная Relative
Средняя стоимость приобретения земельного участка The average cost of acquiring a land plot	$\bar{p}_{ср}$	Относительная Relative
Средняя продолжительность предпроектных этапов проекта, связанных с применением принципа «одно окно» The average duration of the pre-project stages of the project associated with the application of the “one window” principle	$\bar{t}_{\infty}$	Относительная Relative
Соотношения вложения бюджетных и частных средств в поддержку и развитие инфраструктуры ОЭЗ The ratio of investments of budgetary and private funds in the support and development of the SEZ infrastructure	$K_{бс}$	Относительная Relative

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 18. Выпуск 10, 2023
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 18. Issue 10, 2023



Рис. 4. Схема этапов исследования по применению методов реализации государственной политики в области промышленности на основе проектов ее развития

Fig. 4. The scheme of the stages of research on the application of methods for the implementation of state policy in the field of industry based on its development projects

проекта, важную роль в оценке которых играют и сами участники потенциального проекта строительства. Данные таблицы получены в ходе аналитического обзора ряда источников открытой информации, которые содержат необходимые сведения¹.

Для использования инструмента корреляционного анализа в установлении тесноты связи между изучаемыми показателями в исследовании были сформированы пары переменных, которые основаны на показателях табл. 3:

1. Количество организаций ИСС и ОЭЗ, имеющих строительную направленность, осуществляющих деятельность в едином субъекте РФ.
2. Стоимость аренды и покупки земельного участка и количество организаций ИСС в данной ОЭЗ.
3. Динамика роста количества ОЭЗ и организаций ИСС полного цикла.
4. Величина свободной земли и количество организаций ИСС в выбранной ОЭЗ.

Выбор именно этих ОЭЗ обусловлен их соответствием цели настоящего исследования, поскольку они являются репрезентацией ОЭЗ двух типов — ППТ и ТВТ, на которые на уровне государственного регулирования возложено решение зада-

чи по обеспечению превращения промышленности в конкурентоспособную и инновационную сферу экономики страны [16]. Кроме того, представленные в таблице ОЭЗ — это лидеры рейтинга по инвестиционной привлекательности¹. Целесообразности в изучении выборки всех ОЭЗ, действующих на территории страны, нет — многие из них не обладают достаточной экономической активностью, чтобы предоставить релевантные данные для анализа, ввиду низкого качества их управления [17].

На основе применения предложенных показателей в порядке эксперимента для выбранной совокупности ОЭЗ составлена табл. 4. Она представляет собой промежуточный результат в исследовании, который в дальнейшем послужил основой формирования пар переменных корреляции, позволяющих сделать прогноз эффективности осуществления проектной деятельности в ОЭЗ.

Перечень анализируемых ОЭЗ выбран исходя из целей исследования методом стратифицированных выборок путем разбиения всей генеральной совокупности ОЭЗ на подгруппы, которые важны для выявления значимости аналитических зависимостей.

В экспериментальной части исследования был проведен анализ именно этих показателей и пар пере-

Табл. 4. Данные для оценки перспектив реализации проекта развития промышленности в ОЭЗ

Table 4. Data to assess the prospects for the implementation of the industrial development project in the SEZ

ОЭЗ SEZ	Количество организаций полного цикла, ед. Number of full-cycle organizations		Количество резидентов, ед. Number of residents	Количество резидентов ИСС, ед. Number of ICS residents	Стоимость продажи земельного участка, тыс. руб. The cost of selling a land plot, thousand rubles	Стоимость аренды в год, тыс. руб. The cost of rent per year, thousand rubles	Объем инвестиций, млн руб. Volume of investments, million rubles	
	Общее General	ИСС ICS					Общие General	Частные Private
Алабуга Alabuga	7	2	65	9 (2)	119,66	53,2	181 726	141 931
Липецк Lipetsk	4	3	58	5 (4)	180,7	20,7	85 296	70 688
Ульяновск Ulyanovsk	2	0	43	4 (3)	16,7	4,5	8909	4800
Ступино-квадрат Stupino-kvadrat	3	0	14	1	25 737	—	13 457	12 971
Моглино Moglino	1	0	16	4	156,0	7800	10 866	7813
Тольятти Tolyatti	2	0	31	3 (2)	73 375	14 675	25 656	15 972
Узловая Uzlovaya	2	0	18	4 (2)	268,1	49,2	9591	8128
Калуга Kaluga	2	1	18	6	1362	109	39 327	32 670
Титановая долина Titanovaya dolina	2	1	20	1	130/952	26,9/51,6	13 149	8363
Кашира Kashira	3	0	2	1	24 000	4800	187	187
Лотос Lotos	1	(0)	16	3	650	25 000	2780	1807
Алга Alga	0	0	6	0	28	—	839	485

менных корреляции, так как необходимо было получить статистическую взаимосвязь двух и более случайных величин с последующим определением типа корреляционной связи, предполагающей выявление того, каким образом изменяются пары переменных — функционально или статистически [32, с. 72]. Ввиду этого в исследовании демонстрируется принцип работы предлагаемых авторами методов для прогнозирования перспектив реализации проектов развития промышленности на территории конкретной ОЭЗ. Рассматриваемые аналитические зависимости — это лишь один из вариантов использования показателей, который позволяет выявить закономерности и прогнозировать эффекты от реализации проектов развития промышленности в ОЭЗ, определяя при этом, какая из зависимостей обладает наибольшей значимостью для осуществления

проектной деятельности в ОЭЗ, чтобы в дальнейшем корректировать аспекты проводимой госполитики.

В ходе апробации проведен корреляционный и регрессионный анализ на примере определения зависимости между количеством организаций, способных осуществлять строительство объектов промышленности, в ОЭЗ и количеством организаций полного цикла строительной направленности в едином субъекте РФ, направленный на установление динамики формирования организаций полного цикла на едином территориальном субъекте РФ с количеством организаций, локализованных в ОЭЗ.

Предполагается, что сила связи этих признаков позволит оценить, существует ли зависимость между появлением организаций полного цикла строительства и тем, как много организаций-резидентов было привлечено в ОЭЗ (двух типов — ППТ

и ТВТ). Установление направленности, силы и тесноты этой связи дает возможность выявить наличие закономерностей в их функционировании, чтобы в перспективе прогнозировать сценарии реализации проектов развития промышленности в ОЭЗ на основе изучения этих аналитических зависимостей.

Данные по расчету и определению взаимосвязи переменных представлены в табл. 5.

Таким образом, значение коэффициента корреляции Пирсона следующее:

$$r = \frac{5,5}{\sqrt{54,92 \cdot 6,61}} = 0,28. \tag{10}$$

Согласно шкале величин степеней корреляции Чеддока, можно отметить умеренную (среднюю) функциональную зависимость и связь переменных. Для достоверности полученных результатов осуществим расчет *t*-критерия Стьюдента:

$$t_p = \frac{0,28 \cdot \sqrt{10}}{\sqrt{1 - 0,28}} = 1,52. \tag{11}$$

В соответствии с критическими значениями *t*-критерия Стьюдента полученное значение меньше

Табл. 5. Данные по расчету коэффициента корреляции Пирсона для изучения взаимосвязи переменных

Table 5. Data on the calculation of the Pearson correlation coefficient for studying the relationship of variables

ОЭЗ SEZ	Количество предприятий ИСС в ОЭЗ <i>x</i> Number of ICS organizations in the SEZ	Количество организаций полного цикла <i>y</i> Number of full-cycle organizations	$\bar{x} - x$	$\bar{y} - y$	$(\bar{x} - x)^2$	$(\bar{y} - y)^2$	$(\bar{x} - x) \cdot (\bar{y} - y)$
Алабуга Alabuga	9 (2)	2	-5,4	-0,1	29,16	0,01	7,05
Липецк Lipetsk	5 (4)	3	-1,4	-1,1	1,96	1,21	1,54
Ульяновск Ulyanovsk	4 (3)	2	-0,4	0,1	0,16	0,01	-0,04
Ступино-квадрат Stupino-Kvadrat	1	3	2,6	1,1	6,76	1,21	2,86
Моглино Moglino	4	1	-0,6	0,9	0,36	0,81	-0,54
Тольятти Tolyatti	3 (2)	2	0,6	-0,1	0,36	0,01	-0,06
Узловая Uzlovaya	4 (2)	2	-0,4	-0,1	0,16	0,01	0,04
Калуга Kaluga	6	2	-2,4	-0,1	5,76	0,01	0,24
Титановая долина Titanovaya dolina	1	2	2,6	-0,1	6,76	0,01	-0,26
Кашира Kashira	1	3	2,6	-1,1	6,76	1,21	-2,86
Лотос Lotos	3	1	0,6	0,9	0,36	0,81	0,54
Центр Centre	2	2	1,6	-0,1	2,56	1,21	-0,16
Итог Result	43 ($\bar{x} = 3,6$)	23 ($\bar{y} = 1,9$)	–	–	54,92	6,51	5,5

табличного, что подтверждает недостаточную значимость рассчитанного коэффициента корреляции для подтверждения.

Следующим этапом апробации необходимо определить коэффициенты линейной регрессии. Для этого применяется метод наименьших квадратов, чтобы минимизировать суммы квадратов отклонений функций от исходных переменных.

В результате преобразования рассчитываются значения коэффициентов регрессии, которые формируют искомое уравнение $\hat{y}$ [33].

Регрессионный анализ позволяет прогнозировать степень и перспективы реализации проектов развития промышленности в ОЭЗ, отразив функциональные зависимости между изучаемыми явлениями.

В табл. 6 приведены данные, которые необходимы для расчета линейной регрессии для каждой из выбранных ОЭЗ.

Таким образом, расчет коэффициентов линейной регрессии приобретает следующий вид:

$$a = \frac{12 \cdot 89 - 43 \cdot 23}{12 \cdot 215 - 43^2} = 0,1; \tag{12}$$

$$b = \frac{23 - 0,1 \cdot 43}{12} = 1,52. \tag{13}$$

По итогам расчетов коэффициентов построим уравнение регрессии:

$$y = 0,1 + 1,52x. \tag{14}$$

В завершение определим коэффициент детерминации:

$$R^2 = 0,28^2. \tag{15}$$

Поведенный регрессионный и корреляционный анализ показал, что степень связи между исследуемыми переменными малозначительная, однако следует отметить, что вероятной причиной такого результата послужила ограниченная выборка, которая была сформирована в обстоятельствах ограниченных данных, фиксируемых органами государственной статистики. В условиях совершенствования системы данных государственной статистики РФ репрезентативность и диапазон аналитики для принятия решений может быть расширен. На этом этапе исследований сделан

Табл. 6. Данные для определения коэффициентов линейной регрессии

Table 6. Data for determining linear regression coefficients

ОЭЗ SEZ	x	y	xy	x ²
Алабуга Alabuga	9 (2)	2	18	81
Липецк Lipetsk	5 (4)	3	15	25
Ульяновск Ulyanovsk	4 (3)	2	8	16
Ступино-квадрат Stupino-Kvadrat	1	3	3	1
Моглино Mogilino	4	1	4	16
Тольятти Tolyatti	3 (2)	2	6	9
Узловая Uzlovaya	4 (2)	2	8	16
Калуга Kaluga	6	2	12	36
Титановая долина Titanovaya dolina	1	2	2	1
Кашира Kashira	1	3	3	1
Лотос Lotos	3	1	3	9
Центр Centre	2	2	4	4
Итог Result	43	23	89	215

ряд выводов относительно объема данных, при формировании которых в дальнейших исследованиях надо подходить, учитывая следующее:

1. Репрезентативность характеристик выборки, заключающаяся в обобщении изучаемого признака генеральной совокупности в той же пропорции и частотой проявления. На практике это означает, что выборка должна быть достаточно объемной, а принцип отбора случайным или стратифицированным, что предпочтительней при статистической неоднородности генеральной совокупности. В случае ОЭЗ выборка обладает ограниченностью, обусловленной незначительным количеством ОЭЗ, которые активно ведут экономическую деятельность — многие из них находятся только на этапе ввода в эксплуатацию и не имеют большого количества резидентов для выявления аналитических зависимостей, другие — убыточны и не обладают научной ценностью для цели исследования.

2. Точность в установлении значимости коэффициента корреляции, что особенно важно в случае малых выборок, когда есть вероятность трактования неверных результатов в силе корреляции — она может оказаться сильной, однако будет статистически незначимой. Для верификации корреляции проводится сравнение расчетного критерия Стьюдента t_p с табличным значением критерия t_p , принимаемыми по заданным уровням значимости α , как правило, равными 0,05 или 0,01.

3. Обязательно следует учитывать направленность корреляции, которая может быть положительной или отрицательной. На практике это означает то, каким образом изменение величины одного показателя влияет на величину другого — в прямой или обратной зависимости [32, с. 71].

4. Важным условием определения тесноты связи пар переменных корреляции является расчет коэффициента детерминации, который характеризует долю дисперсии y . Назначение этого коэффициента в отражении того, насколько изменения зависимой переменной зависят от изменения независимой и с какой вероятностью.

В целом надо отметить, что представленная совокупность показателей и методы обработки данных представляют собой базовое решение, отличающееся новизной и в постановке, и в полученном результате. Но оно должно совершенствоваться и еще требует определенного количества прикладных исследований на большом количестве данных, которые дадут возможность скорректировать разработанные методы экспериментальным путем, что может быть успешно реализовано в условиях цифровизации, когда оперируют с Big Data. Использование совокупности показателей с применением предложенных аналитических зависимостей в практической деятельности при выявлении условий реализации государственной политики в области промышленности на основе оценки перспектив реа-

лизации проектов строительства объектов промышленности в ОЭЗ в охарактеризованных выше условиях предполагает следующую последовательность действий при принятии управленческих решений:

1) конкретизация задач, учитывающих среду реализации проекта развития промышленности в ОЭЗ:

- осуществление анализа финансово-хозяйственной деятельности организации, намеревающейся вести деятельность в ОЭЗ и участвовать в реализации проекта, как носителя факторов производства конечного продукта ИСД;

- проведение анализа среды, учитывая влияние экстерналий и интерналий, характеризующих условия проекта развития промышленности;

2) определение функциональных направлений применения синтезируемой совокупности показателей;

3) дифференцирование показателей в зависимости от среды — внутренней или внешней, что способствует формированию независимой совокупности показателей, обладающей возможностью изменения состава или изъятия показателей в динамике;

4) введение требований к синтезу показателей и уточнений аспектов их применимости в отношении условий реализации проекта развития промышленности;

5) формирование совокупности показателей, используемых для оценивания;

6) осуществление оперативной корректировки разработанной совокупности показателей (при необходимости) и контроль за эффективностью их использования в форме получения обратной информации (отчет).

Авторская позиция на исследуемую проблематику заключается в том, что по мере развития предложенных методов, их использования в анализе инвестиционных ситуаций в связи со строительством объектов промышленной недвижимости в РФ, станет возможным выявить неблагоприятные для реализации госполитики тенденции, чтобы в дальнейшем избегать связанных с ними сложностей и прогнози-

ровать на объективной основе сценарии реализации проектов развития промышленности в ОЭЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведен анализ взаимодействия организаций, осуществляющих строительство объектов промышленности, и самой ОЭЗ, включая организации-резиденты, осуществляющие деятельность на ее территории при реализации проектов развития промышленности на основе строительства соответствующих объектов в рамках проводимой государством политики по обеспечению сбалансированного пространственного развития регионов страны.

Выявлены условия, характеризующие взаимоотношения потенциальных участников проектной деятельности, заключающиеся в повышении промышленного потенциала регионов РФ на основе использования возможностей ОЭЗ, особый статус которых закреплён документами государственного уровня.

Принятый в исследовании подход к анализу взаимодействия участников сформирован на принципах инфографического моделирования, который позволил на теоретическом уровне раскрыть целесообразность сближения экономических систем, обладающих различными нормами функционирования и ведения хозяйственной деятельности — организаций, осуществляющих строительство объектов промышленности, и ОЭЗ, включая ее резидентов [34, 35]; сформировать совокупность показателей, характеризующих эффективность реализации ими проектов развития промышленности в ОЭЗ, и описать аналитические зависимости, характеризующие взаимосвязи участников реализации проектов.

По этой причине дальнейшие исследования следует сконцентрировать на поиске комплекса зависимостей, которые влияют на успех реализации проектов развития промышленности в широком спектре рассматриваемых факторов, а также на определение преимуществ взаимодействия участников и последующую оценку эффективности проекта на различных этапах его жизненного цикла в ОЭЗ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гуляева В.Б. Особые экономические зоны технико-внедренческого типа как инструмент пространственного развития экономики России // Инновации. 2019. № 9 (251). С. 79–84. DOI: 10.26310/2071-3010.2019.251.9.012. EDN DHNOUP.

2. Сиваш О.С. Особые экономические зоны и их влияние на устойчивое развитие инвестиционного процесса // Научный вестник: финансы, банки, инвестиции. 2018. № 4 (45). С. 142–152. EDN VPIUAC.

3. Миннигалиева И.И., Абзалова Г.Р., Ахметзянов И.А. Особые экономические зоны как форма

государственно-частного партнерства // Аллея науки. 2020. Т. 1. № 5 (44). С. 707–711. EDN FPMUZB.

4. Булавко О.А. Особые экономические зоны как катализатор развития российской промышленности // Экономика, предпринимательство и право. 2020. Т. 10. № 4. С. 987–996. DOI: 10.18334/errp.10.4.100775. EDN JNYZTO.

5. Зубик В.П. Особые экономические зоны как катализатор развития российской экономики // Наукосфера. 2020. № 10–1. С. 147–151. EDN TCWNLG.

6. Haaskjold H., Andersen B., Alexander J. Dissecting the project anatomy: Understanding the cost

of managing construction projects // *Production Planning & Control*. 2021. Vol. 34. Issue 2. Pp. 117–138. DOI: 10.1080/09537287.2021.1891480

7. *Abd El-Karim M.S.B.A., Mosa El Nawawy O.A., Abdel-Alim A.M.* Identification and assessment of risk factors affecting construction projects // *HBRC Journal*. 2017. Vol. 13. Issue 2. Pp. 202–216. DOI: 10.1016/j.hbrcj.2015.05.001

8. *Искандаров Д.З., Бороздина С.М.* Сравнительный анализ реализации инвестиционно-строительного проекта в особой экономической зоне и в обычных проектных условиях // *Вестник гражданских инженеров*. 2022. № 1 (90). С. 158–164. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-1-158-164. EDN UFLFVU.

9. *Гайнетдинов Р.Р.* Особенности правового статуса управляющих компаний, осуществляющих деятельность в особых экономических зонах России и в Инновационном центре «Сколково» // *Современные тенденции в экономике и управлении: новый взгляд*. 2013. № 20. С. 223–228. EDN ROZDEL.

10. *Fish C.A.* Land acquisition for special economic zones in India. Temple University Graduate Board. Philadelphia, 2011. 171 p. DOI: 10.34944/dspace/1202

11. *Миролюбова Т.В., Коцеев Д.А.* Системно-пространственная методика оценки влияния промышленного кластера на социально-экономическое развитие региона // *Journal of New Economy*. 2022. Т. 23. № 4. С. 69–86. DOI: 10.29141/2658-5081-2022-23-4-4. EDN PGYYUB.

12. *Bittencourt B., Zen A., Schmidt V., Wegner D.* The orchestration process for emergence of clusters of innovation // *Journal of Science and Technology Policy Management*. 2018. Vol. 11. Issue 3. Pp. 277–290. DOI: 10.1108/JSTPM-02-2018-0016

13. *Namyślak B.* Barriers to the development of creative clusters in Poland // *Regional Studies, Regional Science*. 2020. Vol. 7. Issue 1. Pp. 412–427. DOI: 10.1080/21681376.2020.1814853

14. *Гневанов М.В.* Преимущества, возможности и проблемы предприятий инвестиционно-строительного комплекса, функционирующих на территории ОЭЗ промышленного типа // *Недвижимость: экономика, управление*. 2017. № 4. С. 73–76. EDN YOQNGJ.

15. *Чулков В.О.* Инфографические модели системоквантов в конвергенции норм при их взаимодействии // *Вестник Международной академии наук (Русская секция)*. 2012. № 2. С. 046–055. EDN ROMSIP.

16. *Андреева И.А.* Особые экономические зоны: современное состояние и эффективность // *E-Scio*. 2020. № 6 (45). С. 493–501. EDN YPRSWA.

17. *Ниязбекова Ш.У., Назаренко О.В., Буневич К.Г., Иванова О.С.* Особые экономические зоны России: анализ, проблемы и пути их решения // *На-*

учный вестник: финансы, банки, инвестиции. 2019. № 2 (47). С. 213–222. EDN BPJTTH.

18. *Орuch Т.А.* Особые экономические зоны России: оценка эффективности деятельности и практика привлечения инвестиций // *Вестник Самарского университета. Экономика и управление*. 2020. Т. 11. № 2. С. 49–55. DOI: 10.18287/2542-0461-2020-11-2-49-55. EDN NEJPVE.

19. *Янова Е.А., Валдайцева М.В., Грибанова Н.В.* Особые экономические зоны как элемент государственной инновационной политики // *Вестник Алтайской академии экономики и права*. 2019. № 5–2. С. 120–124. EDN ZKFDFF.

20. *Басенко А.М., Таранов П.В.* Особые экономические зоны как институциональный инструмент мобилизации инвестиционно-финансового потенциала территориального развития // *Финансовые исследования*. 2016. № 1 (50). С. 20–28. EDN WBCWMF.

21. *Naeem S., Waheed A., Khan M.N.* Drivers and barriers for successful Special Economic Zones (SEZs): Case of SEZs under China Pakistan economic corridor // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Issue 11. P. 4675. DOI: 10.3390/su12114675

22. *Искандаров Д.З., Бороздина С.М.* Принцип «одно окно», как ключевое преимущество при реализации инвестиционно-строительного проекта в особой экономической зоне // *Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова*. 2021. № 2 (72). С. 303–314. DOI: 10.35803/1694-5298.2021.2.303-314. EDN AEBKVQ.

23. *Михайлова Н.И.* Анализ внешних и внутренних факторов инвестиционных проектов предприятия // *Научный журнал*. 2020. № 2 (47). С. 49–52. EDN WAHPYP.

24. *Liu W., Shi H.-B., Zhang Z., Tsai S.-B., Zhai Y., Chen Q., Wang J.* The development evaluation of economic zones in China // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018. Vol. 15. Issue 1. P. 56. DOI: 10.3390/ijerph15010056

25. *Костылева В.И.* Инструменты регулирования экстерналий: сравнительный анализ // *Вестник Ростовского государственного экономического университета*. 2018. № 3 (63). С. 144–152. EDN YPMGIH.

26. *Epstein R.A.* Positive and negative externalities in real estate development // *Minnesota Law Review*. 2018.

27. *Wang X.* The role of economic development zones in national development strategies: The case of China : thesis ... Doctor of Philosophy. Pardee RAND Graduate School, Santa Monica, 2013. 139 p.

28. *Vallejo H.* Agent failures: A theory of internalities // *SSRN Electronic Journal*. 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4381415

29. *Mohajan D., Mohajan H.* Profit maximization strategy in an industry : a sustainable procedure // *Law*

and Economy. 2022. Vol. 1. Issue 3. DOI: 10.56397/le.2022.10.02

30. Lin L., Yuan G.X., Wang H., Xie J. The stochastic incentive effect of venture capital in partnership systems with the asymmetric bistable Cobb–Douglas utility // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2019. Vol. 66. Pp. 109–128. DOI: 10.1016/j.cnsns.2018.06.010

31. Chatterjee S. A new coefficient of correlation // *Journal of the American Statistical Association*. 2021. Vol. 116. Issue 536. Pp. 2009–2022. DOI: 10.1080/01621459.2020.1758115

32. Баврина А.П., Борисов И.Б. Современные правила применения корреляционного анализа //

Медицинский альманах. 2021. № 3 (68). С. 70–79. EDN TPSSIX.

33. Park B.U., Mammen E., Lee Y.K., Lee E.R. Varying coefficient regression models: a review and new developments // *International Statistical Review*. 2015. Vol. 83. Issue 1. Pp. 36–64. DOI: 10.1111/insr.12029

34. Kowalski A.M. Towards an asian model of clusters and cluster policy: The super cluster strategy // *Journal of Competitiveness*. 2020. Vol. 12. Issue 4. Pp. 74–90. DOI: 10.7441/joc.2020.04.05

35. Komorowski M. Identifying industry clusters: a critical analysis of the most commonly used methods // *Regional Studies, Regional Science*. 2020. Vol. 7. Issue 1. Pp. 92–100. DOI: 10.1080/21681376.2020.1733436

Поступила в редакцию 25 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 28 августа 2023 г.

Одобрена для публикации 29 августа 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Наталья Григорьевна Верстина** — доктор экономических наук, профессор, заведующая кафедрой менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 287560, Scopus: 6506229832; ORCID: 0000-0003-1152-8129; ResearcherID: B-4162-2016; verstinang@mgsu.ru;

Далер Зарифович Искандаров — аспирант кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; iskandarovdaler@gmail.com.

Вклад авторов:

Верстина Н.Г. — научное руководство, выбор методологии и научное редактирование материалов.

Искандаров Д.З. — идея, сбор и обработка материала, написание текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Gulyaeva V.B. Technological special economic zones as an spatial development instrument of the Russian economy. *Innovations*. 2019; 9(251):79–84. DOI: 10.26310/2071-3010.2019.251.9.012. EDN DHNOUP. (rus.).

2. Sivash O.S. Special economic zones and their impact on the sustainable development of the investment process. *Scientific Bulletin: finance, banks, investments*. 2018; 4(45):142–152. EDN VPIUAC. (rus.).

3. Minnigalieva I.I., Abzalova G.R., Akhmetzyanov I.A. Special economic zones as a form of public-private partnership. *Alley of Science*. 2020; 1(5):707–711. EDN FPMUZB. (rus.).

4. Bulavko O.A. Special economic zones as a catalyst for the development of Russian industry. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*. 2020; 10(4):987–996. DOI: 10.18334/epp.10.4.100775. EDN JNYZTO. (rus.).

5. Zubick V.P. Special economic zones as a catalyst for the development of Russian economy. *Naukosphere*. 2020; 10-1:147–151. EDN TCWNLG. (rus.).

6. Haaskjold H., Andersen B., Alexander J. Dissecting the project anatomy: Understanding the cost of managing

construction projects. *Production Planning & Control*. 2021; 34(2):117–138. DOI: 10.1080/09537287.2021.1891480

7. Abd El-Karim M.S.B.A., Mosa El Nawawy O.A., Abdel-Alim A.M. Identification and assessment of risk factors affecting construction projects. *HBRC Journal*. 2017; 13(2):202–216. DOI: 10.1016/j.hbrej.2015.05.001

8. Iskandarov D.Z., Borozdina S.M. Comparative analysis of an investment and construction project implementation in a special economic zone and in typical project conditions. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 1(90):158–164. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-1-158-164. EDN UFLFVU. (rus.).

9. Gainetdinov R.R. Features of the legal status of management companies operating in the special economic zones of Russia and in the Innovation Center “Skolkovo”. *Modern Trends in Economics and Management: a new look*. 2013; 20:223–228. EDN ROZDEL. (rus.).

10. Fish C.A. *Land Acquisition for Special Economic Zones in India*. Temple University Graduate Board. Philadelphia, 2011; 171. DOI: 10.34944/dspace/1202

11. Miroljubova T.V., Koshcheev D.A. System spatial method for assessing an industrial cluster’s im-

pact on the regional socioeconomic development. *Journal of New Economy*. 2022; 23(4):69-86. DOI: 10.29141/2658-5081-2022-23-4-4. EDN PGYYUB. (rus.).

12. Bittencourt B., Zen A., Schmidt V., Wegner D. The orchestration process for emergence of clusters of innovation. *Journal of Science and Technology Policy Management*. 2018; 11(3):277-290. DOI: 10.1108/JST-PM-02-2018-0016

13. Namyślak B. Barriers to the development of creative clusters in Poland. *Regional Studies, Regional Science*. 2020; 7(1):412-427. DOI: 10.1080/21681376.2020.1814853

14. Gnevanov M.V. Advantages, opportunities and problems of enterprises of the investment-construction complex that operate on the territory of special economic zone (SEZ) of industrial type. *Real Estate: Economics, Management*. 2017; 4:73-76. EDN YOQNGJ. (rus.).

15. Chulkov V.O. Infographic models of system-quants in the convergence of norms in their interaction. *Bulletin of the International Academy of Sciences (Russian Section) (Electronic resource)*. 2012; 2:046-055. EDN ROMSIP. (rus.).

16. Andreeva I.A. Special economic zones: current state and efficiency. *E-Scio*. 2020; 6(45):493-501. EDN YPRSWA. (rus.).

17. Niyazbekova Sh.U., Nazarenko O.V., Bunevich K.G., Ivanova O.S. Special economic zones of Russia: analysis, problems and their solutions. *Scientific Bulletin: finance, banks, investments*. 2019; 2(47):213-222. EDN BPJTTH. (rus.).

18. Oruch T.A. Special economic zones of Russia: evaluation of efficiency of activity and practice of attracting investments. *Vestnik of Samara University. Economics and Management*. 2020; 11(2):49-55. DOI: 10.18287/2542-0461-2020-11-2-49-55. EDN NEJPVE. (rus.).

19. Yanova E.A., Valdaitceva M.V., Gribanova N.V. Special economic zones as an element of state innovation policy. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2019; 5-2:120-124. EDN ZKFDDF. (rus.).

20. Basenko A.M., Taranov P.V. Special economic zones as an institutional tool for mobilizing investment and financial potential of territorial development. *Financial Research*. 2016; 1(50):20-28. EDN WBCWMF. (rus.).

21. Naem S., Waheed A., Khan M.N. Drivers and barriers for successful Special Economic Zones (SEZs): Case of SEZs under China Pakistan Economic Corridor. *Sustainability*. 2020; 12(11):4675. DOI: 10.3390/su12114675

22. Iskandarov D.Z., Borozdina S.M. The “one window” principle as a key advantage in the implementation of an investment and construction project in a special economic zone. *The herald of Kyrgyz state university*

of construction, transport and architecture named after N. Isanov. 2021; 2(72):303-314. DOI: 10.35803/1694-5298.2021.2.303-314. EDN AEBKVQ. (rus.).

23. Mikhailova N.I. Analysis of external and internal factors of investment projects of the enterprise. *Scientific Journal*. 2020; 2(47):49-52. EDN WAHPYP. (rus.).

24. Liu W., Shi H.-B., Zhang Z., Tsai S.-B., Zhai Y., Chen Q., Wang J. The development evaluation of economic zones in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018; 15(1):56. DOI: 10.3390/ijerph15010056

25. Kostyleva V.I. Instruments for regulating externalities: comparative analysis. *Vestnik of Rostov state University*. 2018; 3(63):144-152. EDN YPMGIH. (rus.).

26. Epstein R.A. Positive and negative externalities in real estate development. *Minnesota Law Review*. 2018.

27. Wang X. *The Role of Economic Development Zones in National Development Strategies: The Case of China : thesis ... Doctor of Philosophy*. Pardee RAND Graduate School, Santa Monica, 2013; 139.

28. Vallejo H. Agent failures: A theory of inter-nalities. *SSRN Electronic Journal*. 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4381415

29. Mohajan D., Mohajan H. Profit maximization strategy in an industry: a sustainable procedure. *Law and Economy*. 2022; 1(3). DOI: 10.56397/le.2022.10.02

30. Lin L., Yuan G.X., Wang H., Xie J. The stochastic incentive effect of venture capital in partnership systems with the asymmetric bistable Cobb–Douglas utility. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2019; 66:109-128. DOI: 10.1016/j.cnsns.2018.06.010

31. Chatterjee S. A new coefficient of correlation. *Journal of the American Statistical Association*. 2021; 116(536):2009-2022. DOI: 10.1080/01621459.2020.1758115

32. Bavrina A.P., Borisov I.B. Modern rules of the application of correlation analysis. *Medical Almanac*. 2021; 3(68):70-79. EDN TPSSIX. (rus.).

33. Park B.U., Mammen E., Lee Y.K., Lee E.R. Varying coefficient regression models: a review and new developments. *International Statistical Review*. 2015; 83(1):36-64. DOI: 10.1111/insr.12029

34. Kowalski A.M. Towards an Asian model of clusters and cluster policy: The super cluster strategy. *Journal of Competitiveness*. 2020; 12(4):74-90. DOI: 10.7441/joc.2020.04.05

35. Komorowski M. Identifying industry clusters: a critical analysis of the most commonly used methods. *Regional Studies, Regional Science*. 2020; 7(1):92-100. DOI: 10.1080/21681376.2020.1733436

Received August 25, 2023.

Adopted in revised form on August 28, 2023.

Approved for publication on August 29, 2023.

B I O N O T E S: **Natalia G. Verstina** — Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of the Department of Management and Innovations; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 287560, Scopus: 6506229832; ORCID: 0000-0003-1152-8129; ResearcherID: B-4162-2016; verstinang@mgsu.ru;

Daler Z. Iskandarov — postgraduate student of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; iskandarovdaler@gmail.com.

Contribution of the authors:

Natalia G. Verstina — scientific supervision, choice of methodology and scientific editing of materials.

Daler Z. Iskandarov — idea, collection and processing of material, writing the text of the article.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 338

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1647-1660

Цепочки создания ценности в строительстве на основе концепции бережливого производства в условиях цифровой трансформации

Кирилл Юрьевич Кулаков, Александр Константинович Орлов,
Вадим Сергеевич Канхва

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В современных условиях фундаментальной основой строительства является процесс создания ценности для пользователя объекта капитального строительства (ОКС) для потребителя. Рассматривается процесс создания ОКС как цепочка создания ценности, обосновывается влияние цифровой трансформации на развитие и динамику этой цепочки. Проведен анализ современных исследований по проблематике влияния цифровизации на цепочки создания ценности, результаты анализа спроецированы на процессы цифровой трансформации экосистемы строительства. Выявлены основные существующие проблемы эффективности реализации проектов в строительстве, в том числе с позиции актуальной задачи повышения производительности труда, а также перспективы цифровизации строительства с позиции цепочек создания ценности с использованием инструментов концепции бережливого производства. Предложен механизм внедрения концепции бережливого производства в строительстве с использованием инструментов цифровизации. На основе результатов финансово-экономического анализа рассчитаны эффекты от внедрения предлагаемых мероприятий, влияющих на сроки реализации инвестиционно-строительных проектов (ИСП), стоимостные и качественные параметры. Предлагаемый подход способствует созданию базы данных о возникновении и путях решения проблем в бизнес-процессах, а также формирует возможности постоянного обучения и мотивирования сотрудников, что полностью соответствует необходимости постоянных улучшений в бережливом строительстве.

Материалы и методы. Методической основой исследования является концепция бережливого строительства применительно к аспектам трансформации цифровой экосистемы строительства. Также использованы системный и ситуационный подходы, методы качественного, сравнительного и факторного анализа результатов зарубежного и отечественного опыта. Для анализа результатов внедрения инструментов бережливого строительства в рамках реализации ИСП применены инструменты инвестиционного анализа и финансово-экономического моделирования.

Результаты. Предложен практический подход к внедрению концепции бережливого производства с использованием инструментов цифровизации в деятельность строительной компании. Проведенный авторами анализ результатов и итогов внедрения цифровых инструментов на базе концепции бережливого строительства в российских условиях позволил количественно определить потери в рамках реализации ИСП, а также рассчитать эффекты от внедрения предлагаемых решений.

Выводы. Рекомендуется участникам экосистемы строительства внедрять концепцию бережливого строительства в интеграции с цифровыми технологиями согласно предложенному практическому подходу для повышения производительности труда и роста эффективности реализуемых инвестиционных проектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бережливое производство, строительство, цифровая трансформация, конкурентное преимущество, ценность, единая информационная система

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кулаков К.Ю., Орлов А.К., Канхва В.С. Цепочки создания ценности в строительстве на основе концепции бережливого производства в условиях цифровой трансформации // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 10. С. 1647–1660. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1647-1660

Автор, ответственный за переписку: Вадим Сергеевич Канхва, KanhvaVS@mgsu.ru.

Value chains in construction based on the concept of lean manufacturing in the conditions of digital transformation

Kirill Yu. Kulakov, Aleksandr K. Orlov, Vadim S. Kankhva

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

ABSTRACT

Introduction. In modern conditions, the fundamental basis of construction is the process of creating value of the capital construction object for the consumer. The article examines the process of creation of capital construction projects as a value

chain and substantiates the influence of digital transformation on the development and dynamics of this chain. The analysis of modern research on the impact of digitalization on value chains is carried out, the results of the analysis are projected onto the processes of digital transformation of the construction ecosystem. The main existing problems of project implementation efficiency in construction, including from the position of the actual task of increasing labour productivity, as well as the prospects for digitalization of construction from the position of value chains using the tools of the lean manufacturing concept are identified. A mechanism for implementing the concept of lean manufacturing in construction using digitalization tools is proposed. Based on the results of the financial and economic analysis, the effects of the implementation of the proposed measures that affect the timing of the implementation of the ICP, cost and quality parameters are calculated. The proposed approach contributes to the creation of a database on the occurrence and ways to solve problems in business processes, as well as creates opportunities for continuous training and motivation of employees, which is fully consistent with the need for continuous improvement in lean construction.

Materials and methods. The methodological basis of the study is the concept of lean construction in relation to aspects of the transformation of the digital construction ecosystem. In addition, systematic and situational approaches, methods of qualitative, comparative and factor analysis of the results of foreign and domestic experience were used in the study. The tools of investment analysis and financial and economic modelling were used to analyze the results of the implementation of lean construction tools within the framework of investment and construction projects.

Results. The authors propose a practical approach to the implementation of the concept of lean production using digitalization tools in the activities of a construction company. The analysis of the results of the introduction of digital tools based on the concept of lean construction in Russia made it possible to quantify the losses in the framework of the implementation of investment and construction projects, as well as to calculate the effects of the implementation of the proposed solutions.

Conclusions. The study recommends participants of the construction ecosystem to implement the concept of lean construction in integration with digital technologies in accordance with the proposed practical approach to increase labour productivity and the efficiency of investment projects implemented.

KEYWORDS: lean manufacturing, construction, digital transformation, competitive advantage, value, unified information system

FOR CITATION: Kulakov K.Yu., Orlov A.K., Kankhva V.S. Value chains in construction based on the concept of lean manufacturing in the conditions of digital transformation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(10):1647-1660. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1647-1660 (rus.).

Corresponding author: Vadim S. Kankhva, KanhvaVS@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Исследуя феномен современного строительства, следует постулировать в качестве его фундаментальной основы понимание строительного производства как процесса создания ценности [1]. Воспринимая строительство как экосистему, необходимо также учитывать современную динамику исследований относительно цепочек создания ценности и обоснования влияния цифровой трансформации (ЦТ) на эффективность этих цепочек¹ [2].

В ходе анализа научной литературы по проблематике цифровизации цепочки создания ценности в целом, цифровизации принципов и инструментов экономики и управления строительством, можно сделать вывод о наличии определенного дуализма мнений. Ряд ученых [3] считает, что кривая распределения добавленной стоимости в цепочках создания ценности в условиях ЦТ показывает повышательную динамику при сочетании инвестиционно-строительного проектирования с цифровыми инструментами изучения потребительского спроса. Другие исследователи склонны разделять строительное производство и цифровизацию, считая фиксирование процессов их оцифровкой не только неэффективным, но и приводящим к потерям финансовых и временных ресурсов. Говоря об эффективности реализации проектов в строительстве, стоит отметить, что вопросы создания ценности на-

прямую связаны с вопросами повышения эффективности реализации проектов в строительстве.

Эффективность проектов, согласно исследованиям [4–6], определяется уровнем производительности труда в строительстве. Превышение бюджета проекта и срыв сроков реализации строительных работ, вызванные недостаточной производительностью труда и проблемами в этой сфере, могут привести к значительным финансовым потерям как для подрядчиков, так и для инвестора проекта [5]. Соответственно, динамика и повышение производительности труда являются важнейшим фактором эффективности инвестиционных проектов (ИП) [4, 5, 7].

Большинство факторов повышения производительности труда связано с организацией и управлением строительным проектом и производством [5, 7, 8]. Поэтому важно рассмотреть меры и концепции повышения производительности труда и создать комплексную стратегию, включающую принципы бережливого строительства и инновационные технологии, в частности BIM [9]. Применение адекватных мер и построение правильной стратегии повышения производительности труда будет способствовать снижению затрат на реализацию проекта, а также получению фирмами конкурентных преимуществ и большей прибыли от реализации ИП [4].

Цифровизация отрасли может стать тем драйвером развития, который сможет решить актуальную задачу повышения производительности труда при одновременном создании дополнительной ценности для основных стейкхолдеров инвестиционно-строительного проекта (ИСП).

¹ World Development Report 2020 // The World Bank. URL: <https://www.worldbank.org/en/publication/wdr2020>

Одним из инструментов создания ценности является инструментарий концепции бережливого производства, которая реализуется на практике во многих отраслях, в том числе и в строительстве.

Концепция бережливого производства представляет собой подход к управлению организацией/отдельным проектом, направленный на повышение качества работы за счет сокращения потерь при реализации того или иного процесса. Этот подход возможно распространить на все этапы девелоперской деятельности — от проектирования и строительства до эксплуатации. Рассматриваемая система, иначе называемая Lean manufacturing, позволяет буквально каждому сотруднику видеть и выявлять потери, действовать так, чтобы ценность выпускаемого продукта неизменно росла.

Развивается применение бережливого производства и принципов в строительных проектах для повышения эффективности. Однако большая часть этих принципов и инструментов не интегрирована с современными цифровыми технологиями, такими как BIM [9, 10]. Комплексное применение Lean-BIM в строительном проекте значительно повысит ценность строительной продукции и процесса [10]. Повышение производительности и эффективности, снижение затрат и потерь в результате интегрированного применения BIM и Lean подтверждено многими трудами [9–11]. Внедрение Lean и BIM при реализации проекта становится новой областью исследований в сфере развития информационных технологий в архитектуре, проектировании и строительстве [9–11].

Согласимся, что возможность анализа больших данных, применения цифровых платформ, интернета вещей приводит к повышению рентабельности сегмента реализации продукции в цепочке создания ценности при одновременном росте производительности труда [12]. Эта тенденция, считаем, характерна и для строительной продукции, учитывая ограниченность информации о потребностях и соответствующие высокие риски, компенсируемые высокой рентабельностью данных звеньев цепочки создания ценности. Применение цифровых технологий для сбора и анализа информации о потребителях позволит снизить риски реализации строительной продукции наряду со снижением количества посредников путем применения цифровых платформ и сервисов для коммуникации производителей с потребителями (аналогично другим цепочкам создания ценности [13]).

Активное обсуждение влияния различных цифровых технологий на цепочки создания ценности зачастую сосредоточено на анализе влияния цифровизации на занятость и мировую торговлю, игнорируя отношения и коммуникации участников цепочек создания ценности [14]. Относительно цифровизации цепочек создания ценности исследователи отмечают ключевую возможность отслеживания движения продукта по всей цепочке с контролем всех материальных потоков и финансовых расчетов, что

приводит к росту прозрачности процессов, а также позволяет повысить эффективность строительного производства на различных этапах цепочки создания ценности и повысить одновременно производительность труда [15]. Согласимся с мнением ряда ученых, считающих, что на современном этапе ЦТ должен осуществляться выход поставщиков цифровых решений за рамки соперничества за потребителя этих решений в направлении переориентации на сотрудничество с такими потребителями за ведущие позиции на рынках конечной продукции, т.е. выхода цепочки создания ценности. Некоторые исследователи уверены, что в условиях цифровой экономики управление дает возможность при существовании средств для онлайн-информирования и привязки к единой модели объекта получать достоверную информацию о действиях каждого из участников в целях координации действий и принятия правильных управленческих решений [16].

Еще одним важнейшим моментом, причем ключевым для реализации цифровых технологий, является высокая турбулентность социально-экономической и политической среды, которая существует с начала пандемии 2020 г. Исследователи отмечают необходимость повышения адаптированности цепочек создания ценности к различного рода шокам; в данном контексте цифровизация создает возможности анализа мониторинга всей цепочки поставок в режиме реального времени, позволяя оперативно реагировать на изменения предпочтений потребителей и динамику внешней среды. Проблема адаптации цепочек создания ценности к различного рода рисковому ситуациям сегодня является первостепенной в соответствующих направлениях исследований². Инструменты цифровизации строительства позволили компаниям, входящим в цепочки создания ценности, повысить эффективность деятельности, устранить потери и снизить потребности в оборотном капитале, что в современных условиях экономической турбулентности следует сбалансировать с необходимостью резервирования и дублирования по ряду позиций в целях поиска оптимального баланса между «точно вовремя» и «на всякий случай». Отметим, что наряду с вышеперечисленными вызовами современная методология ЦТ строительства должна не забывать учитывать климатическую повестку и повестку устойчивого развития³ [2, 17].

² Risk, resilience, and rebalancing in global value chains // McKinsey Global Institute. URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/risk-resilience-and-rebalancing-in-global-value-chains>

³ ГОСТ Р 70339–2022. «Зеленые» стандарты. Финансирование строительной деятельности в целях устойчивого развития. Рамочные основы и принципы : утв. и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 07.09.2022 № 885-ст.

В определенной мере это позволяют реализовать новые цифровые технологии, параллельно являющиеся инструментом поддержки принятия решений по оперативному реагированию на изменение потребительских предпочтений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Согласно авторской позиции, требуется обеспечение устойчивого развития экосистемы строительства в цифровой экономике с учетом необходимости комплексных преобразований всех подсистем и их взаимосвязей, определяющих сущностную позицию ЦТ как изменения бизнес-процессов. Устойчивое развитие экосистемы строительства в процессе ЦТ должно опираться на создание новой основы цепочки создания ценности в строительстве, т.е. включение нового уникального ценностного предложения (UVP), формирующего уникальное торговое предложение (USP)⁴. Подобная трансформация бизнес-процессов имеет в своей основе замену ключевой компетенции каждого из участников экосистемы строительства. Согласно характеристикам ключевой компетенции, к ним относятся ценность, уникальность и доступность [18]. Соответственно, ключевая компетенция формирует через концепцию цепочки ценностей М. Портера уникальные или устойчивые конкурентные преимущества. Взаимодействия участников экосистемы строительства формируют цепочку или сеть создания ценности, в том числе за счет сокращения потерь, если речь идет об использовании концепции бережливого производства, что позволяет вывести новое уникальное торговое предложение с рынка PropTech на рынок

строительства и включить его в цепочку создания объекта капитального строительства (ОКС) как рыночной ценности.

Отправным пунктом ЦТ экосистемы строительства служит мировоззренческое представление автора о цифровой трансформации в целевой фокусировке уникального результата данных преобразований, эксклюзивного конкурентного преимущества, способного обеспечить лидерство в условиях цифровой экономики (рис. 1).

Таким образом, можно заключить, что общей целью ЦТ экосистемы строительства является комплексная цифровая трансформация экосистемы с переводом ее на новый устойчивый аттрактор.

Позиционируемый новый устойчивый аттрактор должен характеризоваться сменой ключевой компетенции как каждого фактора, так и всей цепочки создания ценности, приводящей к формированию уникального ценностного, затем торгового предложения, порождающего новое качество ЦЭСС, способной обеспечить лидерство в условиях цифровой экономики. Уникальное ценностное предложение должно представлять качественное преобразование экосистемы строительства в цифровую экосистему строительства, включая в ключевую компетенцию системные изменения структурных элементов и взаимосвязей между ними в проекции увеличения прозрачности информационных потоков, релевантности информации, повышения качества процесса и результата инвестиционно-строительного проектирования и всей инвестиционно-строительной деятельности в комплексе. Поэтому создание комплексного представления о будущей архитектуре ЦЭСС, ее конфигурации является не только искомым уникальным результатом процесса ЦТ, но и устойчивым конкурентным преимуществом, создающим область

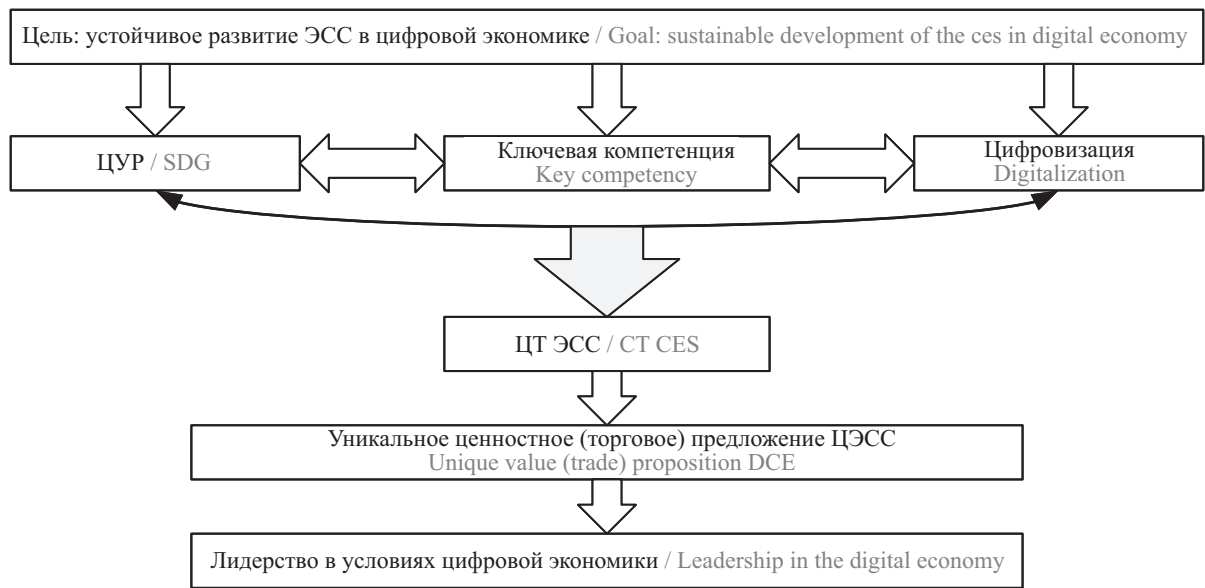


Рис. 1. Мировоззренческое представление о цифровой трансформации экосистемы строительства (ЦЭСС)

Fig. 1. A worldview view of the digital transformation of the construction ecosystem

притяжения с качественным скачком в обеспечении лидерства в цифровой экономике (рис. 2).

Согласимся с мнением исследователей о необходимости цифровизации всего жизненного цикла инвестиционного строительного проекта [16, 19, 20]. Безусловно, наиболее эффективной является цифровизация на основе ТИМ-моделей, однако их достаточно высокая стоимость приводит к необходимости выбора альтернативных решений для ряда предприятий, особенно малых и средних подрядных строительных организаций. Исторически доказано, что внедрение компаниями инноваций в кризисных условиях позволяет получить устойчивые конкурентные преимущества в долгосрочном периоде, в том числе в период восстановления устойчивой экономической динамики [21]. Однако ограниченность ресурсов, во время кризиса ощущаемая на различных уровнях экономики, приводит к необходимости отбора таких инструментов цифровизации, которые позволят оптимизировать соотношение «затраты – эффект» в целевой фокусировке ответа на вызовы, диктуемые современной динамикой среды.

Соответственно, в условиях практической невозможности быстрой комплексной трансформации экосистемы строительства в целевой образ ЦЭСС необходимо выявление тех цифровых инструментов и технологий, которые будут способствовать повышению эффективности строительства в современных условиях экономической турбулентности и приводить не только к повышению уровня устойчивости реализации ИСП, но и устойчивости реализующих эти проекты участников цепочки создания ценности. В этом случае считаем целесообразным осуществление постепенного перехода к цифровизации путем внедрения локальных цифровых инструментов, позволяющих, например, выполнять

онлайн-контроль хода строительного-монтажных работ в соответствии с графиком производства работ, сметной и бухгалтерской документации, либо осуществлять проектирование с переводом модели из 2D в 3D-формат с целью минимизации коллизий [22]. В структуре экосистемы такой подход коррелирует с новой бизнес-моделью S2B2C⁵, обеспечивающей эффективное функционирование малого бизнеса (как строительного, так и по разработке программного обеспечения) на цифровых платформах. Цифровые платформы при этом предоставляют инструменты SaaS, обеспечивают определенную стандартизацию и качество продукта, аналитику данных.

Однако в стратегическом горизонте важно построение общей единой модели ЦТ строительства как в горизонтальной проекции, т.е. в проекции жизненного цикла ИСП, так и в вертикальной проекции, создавая единую информационную систему и соответствующую среду общих данных для взаимодействия всех участников экосистемы строительства в целом, включая государственные органы власти и контрольно-надзорные органы. То есть основой любой бизнес-модели будет создание цифровой платформы единой информационной системы, соответствующей бизнес-модели «плоскости» в трактовке Ц. Мина⁶, продуктом которой является рынок, в данном случае рынок строительной продукции, а деятельностью — управление группами

⁵ Модели бизнеса по Цзэн Минью: C2B и S2B2C. URL: <https://dialog.guide/modieli-bizniesa-po-tszen-miniu-c2b-i-s2b2c/#gsc.tab=0>

⁶ Четыре конфигурации бизнеса по Цзэн Минью. URL: <https://dialog.guide/chietyrie-konfighuratsii-bizniesa-po-tszen-miniu/#gsc.tab=0>

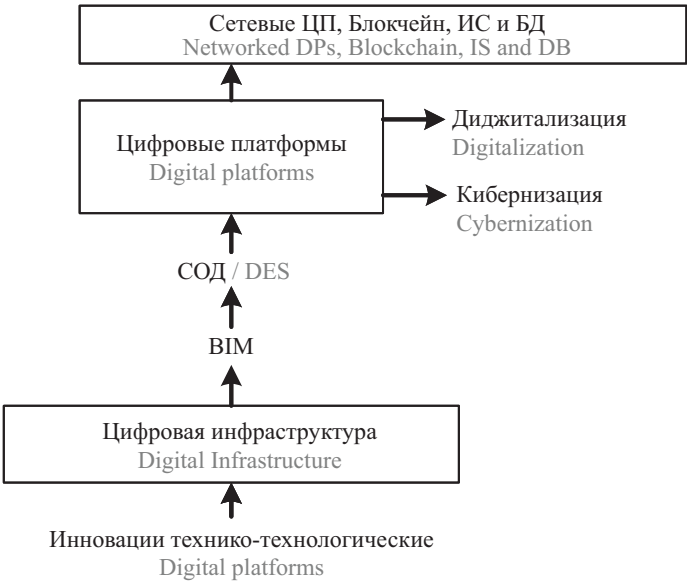


Рис. 2. Целевая архитектура цифровой экосистемы строительства
Fig. 2. Target architecture of the digital construction ecosystem (DCE)

пользователей системы, т.е. участниками и стейкхолдерами строительства, создание правил и институтов для оптимизации системы. В дальнейшем симбиоз единой информационной системы и отдельных составляющих ее функциональных цифровых систем или платформ (реализующих бизнес-модель «плоскости»), компаний — участников цепочки создания ценности в строительстве, ключевым ценностным предложением которых является качественное выполнение своих производственных функций в сегменте ProTech (реализующих бизнес-модель «точки» по Ц. Мину), и компаний — участников цепочки создания ценности в строительстве в плане коммуникаций (например, генподрядчики, девелоперы, риелторы, реализующие бизнес-модель «линии» по Ц. Мину), образуют структуру совместного развития, трактуемую нами как цифровую экосистему строительства.

Согласился с мнением Минстроя РФ, что основу единой информационной системы, подобную вертикаль на федеральном уровне должна создавать государственная информационная система обеспечения градостроительной деятельности (ГИСОГД) [23]. Отметим, что и в горизонтальной проекции, т.е. при управлении жизненным циклом ИСП, предпроектная стадия является наименее проработанной и характеризуется необходимостью анализа многих нормативных документов, большая часть из которых на сегодняшний день, особенно в регионах, не существует в машиночитаемом формате или в каком-либо оцифрованном варианте. Многочисленность и разрозненность информации о регионе, участках строительства, их характеристиках приводит к большим проблемам как в плане пространственного развития страны и регионов, так и в плане предпроектной стадии ИСП. Несмотря на то что каждый из уровней градостроительства (федеральный, муниципальный и региональный) имеет свои стратегии пространственного развития, нормативную документацию по территориальному планированию и программам инфраструктурного развития, системные документы, требующие уровней взаимодействия, разрозненны и имеют массу несостыковок как в горизонтах планирования, так и в связях между различными планами и программами⁷. Подобная ситуация в управлении территориальным развитием приводит не только к невозможности качественной разработки предпроектной стадии инвестиционного строительного проекта, но и к возникновению большого количества спорных и даже судебных рассмотрений каждой конкретной ситуации, в ряде случаев, приводящих к приостановке и пересмотру правил землепользования и застройки, разрешений на строительство и т.д.⁷.

⁷ Пространственное развитие страдает без цифры // Строительный эксперт. URL: <https://ardexpert.ru/article/24173>

Соответственно, переосмысливая ряд исследований [2, 16, 24] в проекции произошедших изменений как требований к цифровизации строительства, так и достигнутых этапов ЦТ [23], нами предложена концептуальная схема целевой архитектуры цифровой экосистемы строительства (рис. 3).

Считаем, что построение цифровой экосистемы строительства на основе предложенной концептуальной схемы будет способствовать не только оптимизации всех бизнес-процессов в рамках создаваемой среды общих данных, но и построению в целом нормативно-правовой основы градостроительства не только с учетом реализуемых изменений бизнес-процессов, таких как программа комплексного инфраструктурного развития, мастер-планы, индекс качества городской среды, но и с возможностью быстрой адаптации бизнес-процессов строительства и механизма взаимодействия участников экосистемы строительства к возможным прогнозируемым вариантам развития территорий на основе потребностей экономической системы.

Обзор литературы, проведенный в статье, и выводы исследования показали целесообразность интеграции Lean-цифровые технологии (Lean Construction 4.0) в строительстве для улучшения коммуникаций участников и увеличения создаваемой ими ценности, а также снижения потерь.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Опрос, проведенный среди профессионалов строительной сферы России, показал наличие многих проблем именно во взаимодействиях участников проекта, приводящих к операционным и межоперационным потерям [9, 25]. Низкое применение BIM в России говорит о необходимости использования цифровых технологий, облегчающих взаимодействия и позволяющих получать оперативную информацию в проекте [23, 25]. Результаты обзора литературы и опроса также показали наличие ряда эффектов в виде снижения потерь от минимальной цифровизации (применения СЭД в проекте), а также от BIM.

Компании, которая приняла решение внедрить концепцию бережливого производства с использованием инструментов цифровизации для повышения эффективности своей деятельности, необходимо начинать внедрение параллельно в трех направлениях [26, 27]:

1. Создание культуры непрерывных улучшений — кайдзен.
2. Развитие персонала в области бережливого производства.
3. Организация коммуникаций участников ИП в строительстве на основе концепции бережливого производства с помощью инструментов цифровизации.

Для того чтобы создание культуры непрерывных улучшений, развитие персонала в области бережливого производства и организация коммуникаций успешно внедрялись в деятельность стро-

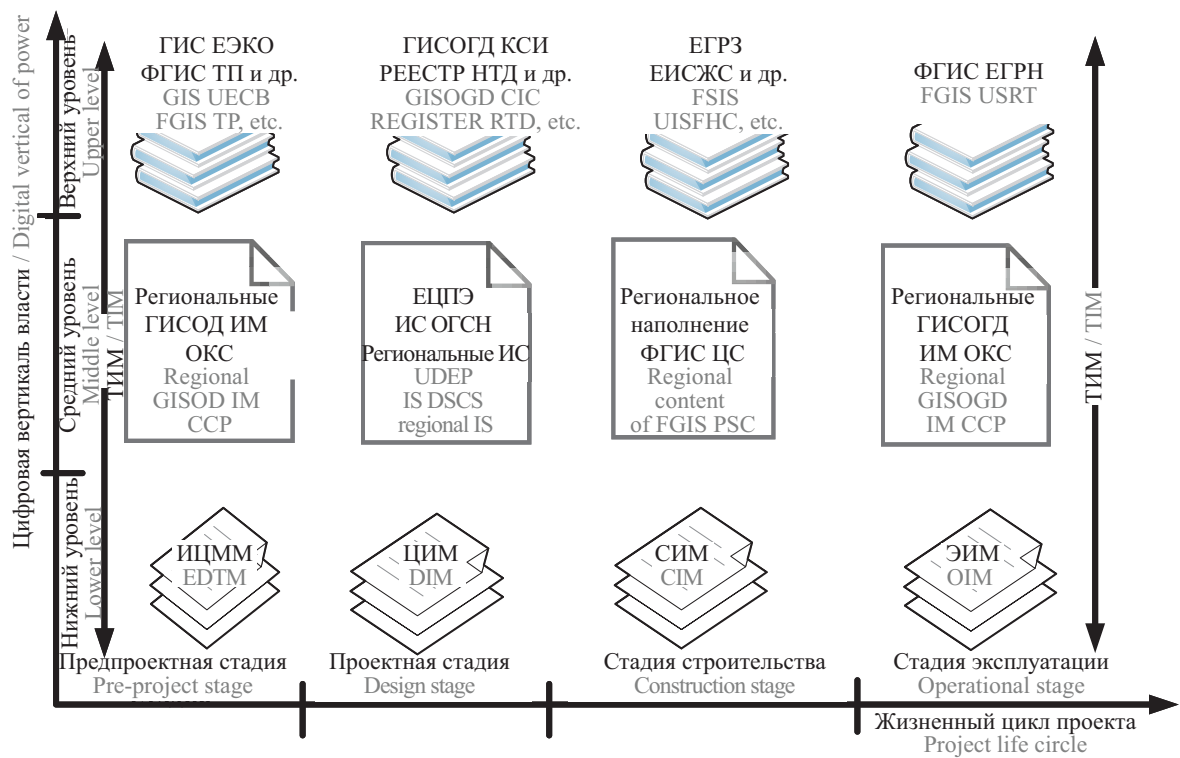


Рис. 3. Схема целевой архитектуры цифровой экосистемы строительства: НТД — нормативно-техническая документация; ИМ ОКС — информационная модель объекта капитального строительства; ИЦММ — инженерная цифровая модель местности; ЦИМ — цифровая информационная модель; СИМ — ЦИМ на стадии строительства (строительная и исполнительная модель); ЭИМ — эксплуатационная информационная модель

Fig. 3. Schematic diagram of the target architecture of the digital construction ecosystem: RTD — regulatory and technical documentation; IM CCP — information model of the capital construction object; EDTM — engineering digital model of the terrain; DIM — digital information model; CIM — DIM at the construction stage (construction and executive model); OIM — operational information model

ительных компаний, необходимо следовать четкой методологии предлагаемого практического подхода. На рис. 4 показан получившийся практический подход к внедрению концепции бережливого производства с использованием инструментов цифровизации в деятельность строительной компании.

Методические наработки, представленные в данной работе, рассмотрены на примере реализации жилого комплекса бизнес-класса «Береговой-2». В ходе реализации проекта компания столкнулась с рядом проблем, которые тем или иным образом влияют на срок сдачи объекта в эксплуатацию, где основной причиной являлась низкая производительность труда на строительной площадке и долгий процесс протекания офисных бизнес-процессов. Руководством компании было принято решение реализовать ряд проектов бережливого производства, интегрированных с цифровыми инструментами, в соответствии с практическим подходом, который представлен на рис. 4.

Реализованы следующие инструменты, перечисленные в табл. 1, и получены соответствующие эффекты.

Необходимо уточнить принятый в работе методический инструментарий для оценки эффектов. В публикациях [28] на основании обширного обзора литературы отмечаются такие эффекты внедрения бережливого строительства и цепочек создания ценности, как производительность, сокращение сроков и затрат, сокращение потерь от безбумажного документооборота.

При расчете эффектов использовался методический инструментарий, предложенный авторами в работах [9, 25, 26]. Суть расчета эффекта следующая. Непроизводительные затраты труда, возникающие из-за простоев, бумажного документооборота, нарушения коммуникаций, наличия запросов на изменения в проекте и т.п., снижающие производительность труда в строительстве, приводят к возникновению транзакционных издержек, которые увеличивают фактические затраты по проекту и время его реализации:

$$TC = \sum_{j=1}^n t_j \cdot Cv_j + \sum_{j=n+1}^m Kt_j \cdot Ct_j + \sum_{j=m+1}^l Ce_j, \quad (1)$$

где TC — суммарные транзакционные издержки; t_j — затраты времени на выполнение j -го вида транс-

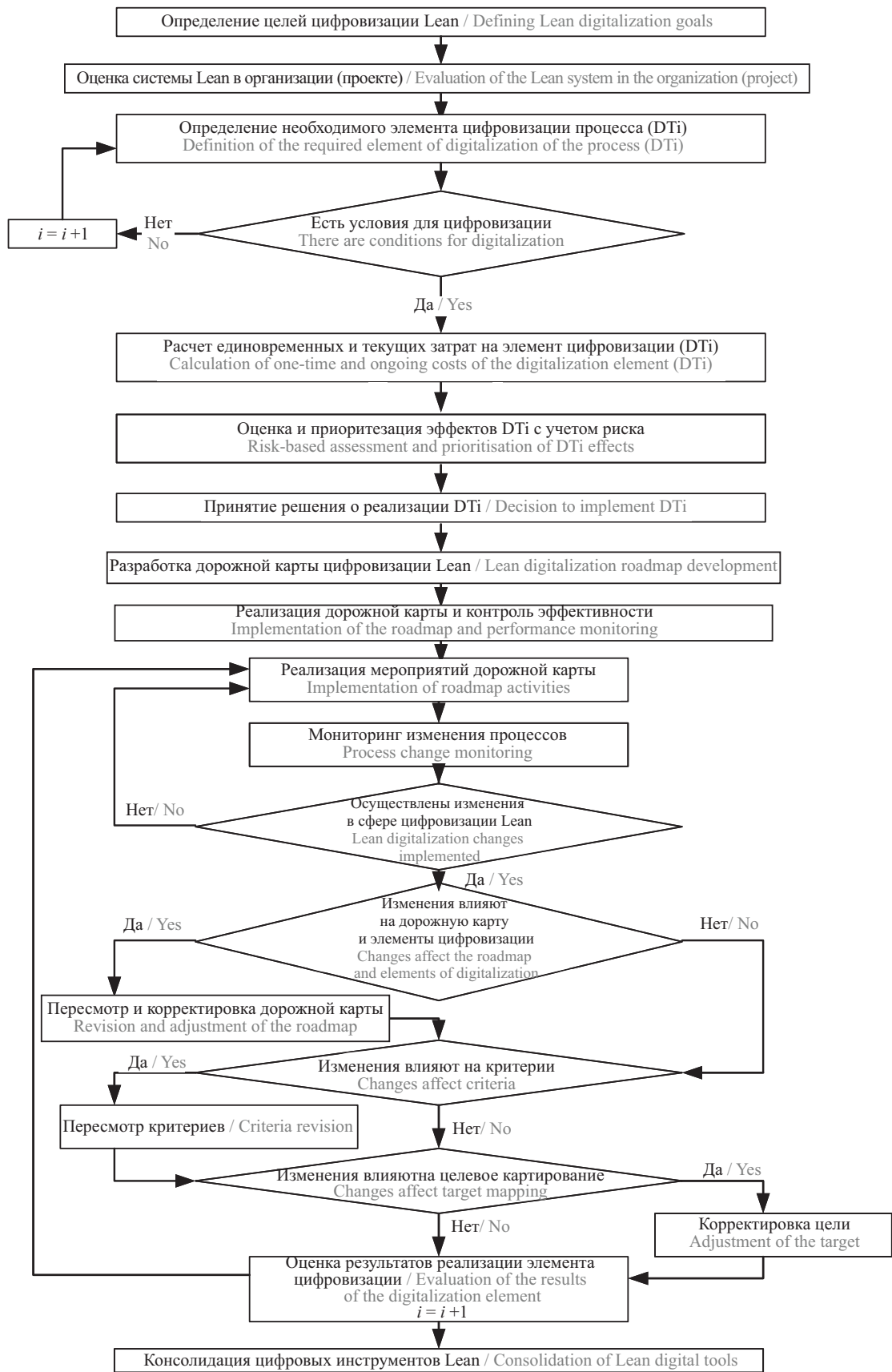


Рис. 4. Практический подход к внедрению концепции бережливого производства с использованием инструментов цифровизации в деятельность строительной компании

Fig. 4. Practical approach to implementing the concept of lean manufacturing using digitalization tools in the activities of a construction company

Табл. 1. Результаты внедрения в проекте «Береговой-2» инструментов бережливого строительства и цифровизации (фрагмент)

Table 1. Results of implementing lean construction and digitalization tools in the Beregovoy-2 project (excerpt)

Проект Lean 4.0 в соответствии с практическим подходом Lean 4.0 project according to the practical approach	Результаты / Results		
	Срок / Time	Качество / Quality	Стоимость / Cost
Устранение коллизий в проекте в результате цифровизации Elimination of project conflicts as a result of digitalization	–58 календарных дней –58 cdays	Замечания сократились с 15 до 0 шт. Remarks reduced from 15 to 0 pcs.	Сократилась на 41,43 млн руб. Cost reduced by 41.43 mln. rub.
Проведение строительного контроля в СЭД Carrying out construction control in EDMS	–68 календарных дней –68 cdays	Замечания сократились с 8 до 2 шт. Remarks reduced from 8 to 2 pcs.	Сократилась на 62,13 млн руб. Reduced by 62.13 mln. rub.
Замена документооборота исполнительной документации на СЭД Replacement of executive documentation workflow in EDMS	–53 календарных дня –53 cdays	—	Сократилась на 5,69 млн руб. Reduced by RUB 5.69 mln.
Оптимизация закупочных процедур с СЭД и ФГИС ЦС Optimization of procurement procedures with EDMS and FGIS CS	–92 календарных дня –92 cdays	Замечания подрядчика сократились с 26 до 2 шт. Contractor’s remarks reduced from 26 to 2 pcs.	—
Внедрение онлайн чек-листов операционного контроля качества Implementation of online operational quality control checklists	–18 календарных дней –18 cdays	Замечания сократились с 12 до 0 шт. Remarks reduced from 12 to 0 pcs.	Сократилась на 1,41 млн руб. Reduced by 1.41 mln. rub.
Обнаружение неучтенных материалов в результате оптимизации ГПП на базе цифровизации Detection of unaccounted materials as a result of digitalization-based optimization of work shedule	–52 календарных дня –52 cdays	—	Сократилась на 11,4 млн руб. Reduced by 11.4 mln. rub.
Удаленная работа на основе СЭД с иностранным архитектурным бюро Remote EDMS-based work with a foreign architectural firm	–113 календарных дней –113 cdays	—	Сократилась на 64,2 млн руб. Reduced by 64.2 mln. rub.
Итого Total	–454 календарных дней –454 cdays	Замечания сократились с 61 до 4 шт. Remarks reduced from 61 to 4 pcs.	Сократилась на 186,26 млн руб. Reduced by 186.26 mln. rub.

акций; Cy_j — стоимость единицы времени j -го вида транзакций; Kt_j — количество транзакций j -го вида; St_j — стоимость одной транзакции j -го вида; Se_j — издержки вида j , определяемые экспертным путем.

Соответственно, внедрение концепции бережливого производства с использованием инструментов цифровизации, снижая непроизводительные потери и повышая производительность труда [27, 28], снижают транзакционные издержки, уменьшают сроки и стоимость проекта.

Логика влияния следующая: «бережливое строительство и цифровизация → снижение непроизводительных затрат → рост производительности труда → сокращение сроков строительства → снижение стоимости → рост эффективности NPV».

Для проекта «Береговой-2» окончательный эффект составил рост NPV на 70 млн руб., рост IRR

на 5,6 %, снижение срока окупаемости проекта более чем на год.

Полученный результат проверен авторами на выборке, состоящей из ряда проектов строительства.

На текущем этапе в рамках рассмотрения возможностей внедрения концепции бережливого производства с использованием инструментов цифровизации авторами был проведен анализ внедрения цифровых инструментов и сервисов на разных стадиях ЖЦ ИСП (за исключением стадии эксплуатации). Цифровые инструменты и технологии затрагивали вопросы предпроектных работ, проектирования и строительства, включая как технические аспекты, связанные с организацией строительного производства, так и с оптимизацией бизнес-процессов на уровне девелопмента ИСП.

Используя инструменты финансового моделирования и бизнес-планирования, выстроены укрупненные финансово-экономические модели ИСП на концептуальной стадии (с использованием укрупненных стоимостных показателей).

Внедрение инструментов бережливого производства ориентировано на обеспечение ценности для потребителя и стейкхолдеров через сокращение потерь, в первую очередь временных. Это, с одной стороны, приводит потенциально к увеличению производительности труда, но одновременно с этим может негативно повлиять на итоговые показатели эффективности проекта в случае, если будет наблюдаться значительный рост затрат на внедрение современных цифровых инструментов.

Для оценки совокупного эффекта от внедрения цифровых инструментов на базе концепции бережливого производства применены традиционные показатели, используемые в инвестиционном анализе, такие как NPV, IRR, PP. В рамках концептуального финансового моделирования были рассмотрены ситуации до внедрения цифровых инструментов и по-

сле. Рассмотрены 15 ИСП в сфере коммерческого строительства в разных сегментах (жилищное строительство, строительство коммерческих объектов, включая торговые и офисные объекты).

Проведен сравнительный анализ, результаты которого приведены в табл. 2. Результаты показывают изменение показателей эффективности при внедрении цифровых инструментов относительно базового варианта.

Полученные результаты подтверждают расчетные параметры, полученные на базе проекта «Береговой-2», разница в результатах финансового моделирования между проектами обусловлена различным масштабом внедрения концепции бережливого строительства и цифровых инструментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Соответственно, предложенный методический инструментарий и практический подход, основанный на комплексном внедрении бережливого строительства и целесообразных при этом инструментов цифровизации, может широко использоваться при

Табл. 2. Результаты финансового моделирования ИСП

Table 2. Results of ICP financial modelling

Описание проекта Project Description	Изменение срока окупаемости PP, % Change in payback period PP, %	Относительное изменение IRR, % Relative change in IRR, %	Относительное изменение NPV, % Relative change in NPV, %	Изменение ставки дисконтирования, абсолютное*, % Change in discount rate, absolute*, %
ЖК бизнес-класса, Москва Business Class Residential Complex, Moscow	-9	+15	+18	-2
ЖК бизнес-класса, Москва Business Class Residential Complex, Moscow	-8,7	+14,3	+17,5	-2
ЖК комфорт-класса, Москва Comfort-class Residential Complex, Moscow	-7,3	+11,5	+18,2	-1,8
ЖК комфорт-класса, Москва Comfort-class Residential Complex, Moscow	-6,8	+10,9	+17,7	-1,8
ЖК комфорт-класса, Москва Comfort-class Residential Complex, Moscow	-6,5	+10,5	+17,5	-1,8
ЖК комфорт-класса, Москва Comfort-class Residential Complex, Moscow	-5,5	+9,8	+16,9	-1,8
ЖК эконом-класса, Москва Economy-class Residential Complex, Moscow	-5,2	+9,3	+16,5	-1,9
ТЦ, г. Москва Shopping centre, Moscow	-4,3	+8,9	+15,1	-1,3
ТЦ, г. Москва Shopping centre, Moscow	-4,5	+9,1	+15,6	-1,3
ТЦ, г. Москва Shopping centre, Moscow	-3,8	+8,7	+14,7	-1,3

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Описание проекта Project Description	Изменение срока окупаемости PP, % Change in payback period PP, %	Относительное изменение IRR, % Relative change in IRR, %	Относительное изменение NPV, % Relative change in NPV, %	Изменение ставки дисконтирования, абсолютное*, % Change in discount rate, absolute*, %
Офисный объект, класс A Class A office building	–5,1	+9,3	+16,1	–1,3
Офисный объект, класс A+ Class A+ office building	–5,3	+9,5	+16,3	–1,3
Офисный объект, класс B+ Class B+ office building	–4,1	+8,8	+15,4	–1,2
Офисный объект, класс B+ Class B+ office building	–3,5	+8,1	+14,9	–1,2
Офисный объект, класс B Class B office building	–3,2	+8,0	+13,9	–1,2

Примечание: * — ставка дисконтирования определялась экспертно с использованием метода кумулятивного построения.

Note: * — the discount rate was determined by experts using the cumulative construction method.

проектировании и строительстве как в проектах жилищного строительства, так и в проектах других видов строительства, применяя и адаптируя различные проекты Lean Construction 4.0 в зависимости от выявленных проблем на стадии проектирования и строительства объекта.

В исследовании рекомендуется участникам экосистемы строительства внедрять концепцию бережливого строительства в интеграции с цифровыми технологиями согласно предложенному практическому подходу для повышения производительности труда и роста эффективности реализуемых ИП. Можно сделать вывод, что существует

ряд ключевых эффектов: сокращение трудозатрат, повышение производительности труда, высвобождение персонала, сокращение сроков реализации ИП, повышение качества строительства (за счет сокращения замечаний и изменений в проекте), сокращение стоимости строительства и повышение NPV инвестиционного проекта. Предлагаемый подход также способствует формированию базы данных о возникновении и путях решения проблем в бизнес-процессах, возможности постоянного обучения и мотивирования сотрудников, что полностью соответствует необходимости постоянных улучшений в бережливом строительстве.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Канхва В.С. Феномен современного строительства: от производственного комплекса к экосистеме // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2021. № 12–2. С. 280–284. DOI: 10.17513/vaael.1995. EDN MDRXJM.

2. Уварова С.С., Андрюнина Я.А., Беляева С.В., Власенко В.А., Гамисония А.Г., Гумба Х.М. и др. Формирование инновационного базиса системной конкурентоспособности строительства и жилищно-коммунального хозяйства в цифровой экономике : монография. Воронеж : Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2020. 178 с. EDN DCOQJB.

3. Устюжанина Е.В., Дементьев В.Е., Евсюков С.Г. Проблемы распределения власти и экономической ренты в сетях создания стоимости // Экономика и математические методы. 2020. Т. 56. № 1. С. 5–17. DOI: 10.31857/S042473880008468-3. EDN TKXUSA.

4. Lee T.Y., Ahmad F., Sarijari M.A. Current Status and Future Research Trends of Construction Labor Productivity Monitoring : a Bibliometric

Review // Buildings. 2023. Vol. 13. Issue 6. P. 1479. DOI: 10.3390/buildings13061479

5. Thomas A.V., Sudhakumar J. Factors influencing construction labour productivity: An Indian case study // Journal of Construction in Developing Countries. 2014. Vol. 19. Issue 1. Pp. 53–68.

6. Ayele S., Fayek A.R. A framework for total productivity measurement of industrial construction projects // Canadian Journal of Civil Engineering. 2019. Vol. 46. Issue 3. Pp. 195–206. DOI: 10.1139/cjce-2018-0020

7. Jarkas A.M., Bitar C.G. Factors affecting construction labor productivity in Kuwait // Journal of Construction Engineering and Management. 2012. Vol. 138. Issue 7. Pp. 811–820. DOI: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0000501

8. Agrawal A., Halder S. Identifying factors affecting construction labour productivity in India and measures to improve productivity // Asian Journal of Civil Engineering. 2020. Vol. 21. Issue 4. Pp. 569–579. DOI: 10.1007/s42107-019-00212-3

9. Uvarova S.S., Orlov A.K., Kankhva V.S. Ensuring Efficient Implementation of Lean Construction Projects Using Building Information Modeling // Buildings. 2023. Vol. 13. Issue 3. P. 770. DOI: 10.3390/buildings13030770

10. Zhang X., Azhar S., Nadeem A., Khalfan M. Using Building Information Modelling to achieve Lean principles by improving efficiency of work teams // International Journal of Construction Management. 2018. Vol. 18. Issue 4. Pp. 293–300. DOI: 10.1080/15623599.2017.1382083

11. Shin M.-H., Jung J.-H., Kim H.-Y. Quantitative and Qualitative Analysis of Applying Building Information Modeling (BIM) for Infrastructure Design Process // Buildings. 2022. Vol. 12. Issue 9. P. 1476. DOI: 10.3390/buildings12091476

12. Porter M.E., Heppelmann J.E. How smart, connected products are transforming competition // Harvard Business Review. 2014. URL: <https://hbr.org/2014/11/how-smart-connected-products-are-transforming-competition>

13. Rungi A., Del Prete D. “Smile Curve”: Where Value is Added Along Supply Chains // SSRN Electronic Journal. 2017. DOI: 10.2139/ssrn.2936710

14. Гохберг Л.М., Грачева Г.А., Дитковский К.А., Евневич Е.И., Кузнецова И.А., Мартынова С.В. и др. Индикаторы инновационной деятельности: 2021 : статистический сборник. М. : НИУ ВШЭ, 2021. 280 с. DOI: 10.17323/978-5-7598-2375-9. EDN GZKEGK.

15. Абдикеев Н.М., Морева Е.Л. Основные тренды развития методов и моделей использования цифровых технологий при создании цепочек воспроизводства добавленной стоимости // Мир новой экономики. 2019. № 13 (3). С. 71–80. DOI: 10.26794/2220-64692019-13-3-71-80

16. Panenkov A., Lukmanova I., Kuzovleva I., Bredikhin V. Methodology of the theory of change management in the implementation of digital transformation of construction: problems and prospects // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 244. P. 05005. DOI: 10.1051/e3sconf/202124405005

17. Орлов А.К., Чубаркина И.Ю. Обеспечение инновации ценности в сфере девелопмента недвижимости. М., 2021. 110 с. EDN COZKRW.

18. Портер М. Конкурентное преимущество: как достичь высокого результата и обеспечить его устойчивость. М. : Альпина Паблишер, 2008. 720 с.

19. Викторов М.Ю., Ларионов А.Н., Власенко В.А. Современная проблематика цифровизации строительства: актуальные направления и методический инструментарий // Информационные и телеком-

муникационные технологии. 2022. № 53. С. 57–64. EDN TREPRL.

20. Уварова С.С., Беляева С.В., Власенко В.А. Инновационное и цифровое развитие предприятий инвестиционно-строительной сферы на основе ценностно-ориентированного подхода // Экономика и предпринимательство. 2022. № 3 (140). С. 1314–1320. DOI: 10.34925/EIP.2022.140.03.255. EDN POGNPS.

21. Власенко В.А. Обоснование концептуальных основ формирования инновационных стратегий на микро- и мезоуровне // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. 2018. Т. 15. № 8. С. 71–76. EDN YMBZZZ.

22. Канхва В.С., Сонин Я.Л. Направления совершенствования инвестиционно-строительного проектирования в условиях цифровой экономики // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2021. № 6–1. С. 61–68. DOI: 10.17513/vaael.1729. EDN MVWSXV.

23. Kankhva V., Andryunina Ya., Belyaeva S., Sonin Ya. Construction in the digital economy: prospects and areas of transformation // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 244. P. 05008. DOI: 10.1051/e3sconf/202124405008

24. Владимирова И.Л., Каллаур Г.Ю., Цыганкова А.А., Папикян Л.М., Тензина П.А. Цифровизация как фактор повышения производительности труда в строительной отрасли // Экономика строительства. 2020. № 3 (63). С. 13–23. EDN SRKFLR.

25. Уварова С.С., Ларионов А.Н., Беляева С.В., Канхва В.С. Управление жизненным циклом объектов капитального строительства: аспект платформизации и цифровизации : монография. М. : Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2023. 144 с. EDN XCXNMR.

26. Orlov A.K., Kankhva V.S. Lean construction concept used to develop infrastructure facilities for tourism clusters // Buildings. 2021. Vol. 12. Issue 1. P. 23. DOI: 10.3390/buildings12010023

27. Erol H., Dikmen I., Birgonul T. Measuring the impact of lean construction practices on project duration and variability: A simulation-based study on residential buildings // Journal of Civil Engineering and Management. 2016. Vol. 23. Issue 2. Pp. 241–251. DOI: 10.3846/13923730.2015.1068846

28. Eldeep A.M., Farag M.A.M., Abd El-hafez L.M. Using BIM as a lean management tool in construction processes — a case study // Ain Shams Engineering Journal. 2022. Vol. 13. Issue 2. P. 101556. DOI: 10.1016/j.asej.2021.07.009

Поступила в редакцию 8 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 24 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 26 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Кирилл Юрьевич Кулаков — доктор экономических наук, профессор кафедры организации строительства и управления недвижимостью; Национальный исследовательский Московский государ-

ственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 360164, ORCID: 0000-0003-2081-7045; kulakovkyu@mgsu.ru;

Александр Константинович Орлов — кандидат экономических наук, директор института экономики, управления и коммуникаций в сфере строительства и недвижимости; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 400958, ORCID: 0000-0003-1800-5478; orlovak@mgsu.ru;

Вадим Сергеевич Канхва — кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и управления в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 587928, ORCID: 0000-0003-2611-1684; kanhvavs@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Кулаков К.Ю. — научное руководство, концепция исследования, нормативно-методическое обеспечение.

Орлов А.К. — методические решения, итоговые выводы.

Канхва В.С. — предоставление фактического материала, анализ статистики, написание текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kankhva V.S. The phenomenon of modern construction: from an industrial complex to an ecosystem. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2021; 12-2:280-284. DOI: 10.17513/vaael.1995. EDN MDRXJM. (rus.).
2. Uvarova S.S., Andryunina Ya.A., Belyaeva S.V., Vlasenko V.A., Gamisonia A.G., Gumba Kh.M. et al. *Formation of an innovative basis for the systemic competitiveness of construction and housing and communal services in the digital economy : monograph*. Voronezh, Publishing and Printing Center “Scientific Book”, 2020; 178. EDN DCOQJB. (rus.).
3. Ustyuzhanina E., Dementiev V., Evsukov S. Distribution of power and economic rent in value networks. *Economics and Mathematical Methods*. 2020; 56(1):5-17. DOI: 10.31857/S042473880008468-3. EDN TKXUSA. (rus.).
4. Lee T.Y., Ahmad F., Sarijari M.A. Current status and future research trends of construction labor productivity monitoring : a Bibliometric Review. *Buildings*. 2023; 13(6):1479. DOI: 10.3390/buildings13061479
5. Thomas A.V., Sudhakumar J. Factors influencing construction labour productivity: An Indian case study. *Journal of Construction in Developing Countries*. 2014; 19(1):53-68.
6. Ayele S., Fayek A.R. A framework for total productivity measurement of industrial construction projects. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2019; 46(3):195-206. DOI: 10.1139/cjce-2018-0020
7. Jarkas A.M., Bitar C.G. Factors affecting construction labor productivity in Kuwait. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2012; 138(7):811-820. DOI: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0000501
8. Agrawal A., Halder S. Identifying factors affecting construction labour productivity in India and measures to improve productivity. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2020; 21(4):569-579. DOI: 10.1007/s42107-019-00212-3
9. Uvarova S.S., Orlov A.K., Kankhva V.S. Ensuring efficient implementation of lean construction projects using building information modeling. *Buildings*. 2023; 13(3):770. DOI: 10.3390/buildings13030770
10. Zhang X., Azhar S., Nadeem A., Khalfan M. Using Building Information Modelling to achieve Lean principles by improving efficiency of work teams. *International Journal of Construction Management*. 2018; 18(4):293-300. DOI: 10.1080/15623599.2017.1382083
11. Shin M.-H., Jung J.-H., Kim H.-Y. Quantitative and qualitative analysis of applying Building Information Modeling (BIM) for infrastructure design process. *Buildings*. 2022; 12(9):1476. DOI: 10.3390/buildings12091476
12. Porter M.E., Heppelmann J.E. How smart, connected products are transforming competition. *Harvard Business Review*. 2014. URL: <https://hbr.org/2014/11/how-smart-connected-products-are-transforming-competition>
13. Rungi A., Del Prete D. “Smile Curve”: Where value is added along supply chains. *SSRN Electronic Journal*. 2017. DOI: 10.2139/ssrn.2936710
14. Gokhberg L.M., Gracheva G.A., Dikovskiy K.A., Evnevich E.I., Kuznetsova I.A., Martynova S.V. et al. *Indicators of innovation activity: 2021 : statistical collection*. Moscow, National Research University Higher School of Economics, 2021; 280. DOI: 10.17323/978-5-7598-2375-9. EDN GZKEGK. (rus.).
15. Abdikeev N.M., Moreva E.L. The main trends in the development of methods and models for the use of digital technologies in the creation of value chains. *World of the new economy*. 2019; 13(1):71-80. DOI: 10.26794/2220-64692019-13-3-71-80 (rus.).
16. Panenkov A., Lukmanova I., Kuzovleva I., Bredikhin V. Methodology of the theory of change management in the implementation of digital transfor-

mation of construction: problems and prospects. *E3S Web of Conferences*. 2021; 244:05005. DOI: 10.1051/e3sconf/202124405005

17. Orlov A.K., Chubarkina I.Yu. *Delivering value innovation in real estate development*. Moscow, 2021; 110. EDN COZKRW. (rus.).

18. Porter M. *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*. Moscow, Alpina, 2008; 720. (rus.).

19. Viktorov M.Yu., Larionov A.N., Vlasenko V.A. Modern problems of digitalization of construction: current trends and methodological tools. *Information and Telecommunication Technologies*. 2022; 53:57-64. EDN TREPRL. (rus.).

20. Uvarova S.S., Belyaeva S.V., Vlasenko V.A. Innovative and digital development of investment and construction enterprises based on a value-oriented approach. *Journal of Economy and Entrepreneurship*. 2022; 3(140):1314-1320. DOI: 10.34925/EIP.2022.140.03.255. EDN POGNPS. (rus.).

21. Vlasenko V.A. Justification of the conceptual bases of formation of innovative strategies in the micro- and mesolevel. *FES: Finance. Economy. Strategy*. 2018; 15(8):71-76. EDN YMBZZZ. (rus.).

22. Kankhva V.S., Sonin Ya.L. Ways of improving investment and construction design in the conditions of the digital economy. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2021; 6-1:61-68. DOI: 10.17513/vaael.1729. EDN MVWSXV. (rus.).

23. Kankhva V., Andryunina Ya., Belyaeva S., Sonin Ya. Construction in the digital economy: prospects and areas of transformation. *E3S Web of Conferences*. 2021; 244:05008. DOI: 10.1051/e3sconf/202124405008

24. Vladimirova I.L., Kallaur G.Yu., Tsygankova A.A., Papikian L.M., Tensina P.A. Digitization as a factor for productivity gains in the construction industry. *Construction Economy*. 2020; 3(63):13-23. EDN SRKFLR. (rus.).

25. Uvarova S.S., Larionov A.N., Belyaeva S.V., Kankhva V.S. *Management of the life cycle of capital construction projects*. Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2023; 144. EDN XCXNMR. (rus.).

26. Orlov A.K., Kankhva V.S. Lean construction concept used to develop infrastructure facilities for tourism clusters. *Buildings*. 2021; 12(1):23. DOI: 10.3390/buildings12010023

27. Erol H., Dikmen I., Birgonul T. Measuring the impact of lean construction practices on project duration and variability: A simulation-based study on residential buildings. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2016; 23(2):241-251. DOI: 10.3846/13923730.2015.1068846

28. Eldeep A.M., Farag M.A.M., Abd Elhafez L.M. Using BIM as a lean management tool in construction processes — a case study. *Ain Shams Engineering Journal*. 2022; 13(2):101556. DOI: 10.1016/j.asej.2021.07.009

Received September 8, 2023.

Adopted in revised form on September 24, 2023.

Approved for publication on September 26, 2023.

B I O N O T E S: **Kirill Yu. Kulakov** — Doctor of Economics Sciences, Professor of the Department of Construction Organization and Real Estate Management; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 360164, ORCID: 0000-0003-2081-7045; kulakovkyu@mgsu.ru;

Aleksandr K. Orlov — Candidate of Economic Sciences, Director of the Institute of Economics, Management and Communications in the Field of Construction and Real Estate; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 400958, ORCID: 0000-0003-1800-5478; orlovak@mgsu.ru;

Vadim S. Kankhva — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Economics and Management in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 587928, ORCID: 0000-0003-2611-1684; kankhvavs@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Kirill Yu. Kulakov — scientific guidance, research concept, regulatory and methodological support.

Aleksandr K. Orlov — methodological decisions, final conclusions.

Vadim S. Kankhva — providing factual material, analyzing statistics, writing the text of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотечных депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в

тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статьи, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия^{2...}

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. **См. рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Abstract (200–250 слов)**Introduction:** text, text, text.**Materials and methods:** text, text, text.**Results:** text, text, text.**Conclusions:** text, text, text.**Key words:** text, text, text.**Acknowledgements:** text, text, text.**Corresponding author:** Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНиП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке источников сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в

статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями **ГОСТа Р 7.0.5–2008**.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Вклад авторов: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В.В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Biographies: Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

Contribution of the authors: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д. / conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, supervision etc.) на английском языке.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

И з в е щ е н и е

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК004525988

КБК

000000000000000000000000130

ОКТМО

45365000

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2023 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа

6 880

руб.

00

коп.

услуги

руб.

коп.

Итого

руб.

коп.

«

»

20

г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Квитанция

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК004525988

КБК

000000000000000000000000130

ОКТМО

45365000

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2023 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа

6 880

руб.

00

коп.

услуги

руб.

коп.

Итого

руб.

коп.

«

»

20

г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

